



EVALUACIÓN DEL USO DE ARCILLAS Y PUZOLANAS EN LA ETAPA DE MOLIENDA DE ACABADO PARA LA FABRICACIÓN DE CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP

RESUMEN

La evaluación del uso de arcillas y puzolanas en la etapa de molienda de acabado para la fabricación de cemento Portland Pozolánico Tipo IP en la Compañía Industrias Guapán S.A, fue realizada con el propósito de dotar de una base de datos, basada en hechos experimentales a la empresa, con la cual se podrá conocer la factibilidad del uso de arcillas, puzolanas y sus combinaciones, en un determinado porcentaje en la etapa de molienda de acabado para la fabricación de cemento. Para ello se analizaron todos los materiales mediante el uso del Análisis Instrumental de Fluorescencia y Difractometría de Rayos X, además del uso de técnicas tradicionales para ensayos Físico – Químicos de las muestras de acuerdo con las necesidades de la Empresa.

Finalmente se realizaron combinaciones de estos materiales con la puzolana que actualmente se utiliza en la fábrica, con el fin de determinar la actividad puzolánica que presentan las combinaciones y observar su comportamiento al someterse a pruebas de resistencia a la ruptura, luego de fabricar cemento a escala laboratorio con cada una de estas combinaciones de materiales. Se muestran además los resultados experimentales obtenidos, así como sus respectivas conclusiones y recomendaciones para la obtención de resultados reales y útiles en la toma de decisiones.



Palabras Claves:

- Arcillas.
- Puzolanas.
- Actividad Puzolánica.
- Cemento Puzolánico
- Difractometría de Rayos X.
- Fluorescencia de Rayos X.
- Molienda de Cemento.



EVALUATION OF THE USE OF CLAY AND POZZOLANS MILLING STAGE OF FINISH FOR THE MANUFACTURE OF IP TYPE POZZOLANIC PORTLAND CEMENT

ABSTRACT

The evaluation of the use of clays and pozzolans in the grinding step for the manufacture of finished IP Type Pozzolan Portland Cement in Guapán Industries Company was conducted for the purpose of providing a data base based on experimental facts to the company, with which it can know the feasibility of using clays, pozzolans, and combinations thereof, in a certain percentage, in the finish grinding step for the manufacture of cement. We analyze all materials using the Instrumental Analysis of Fluorescence and X-ray Diffractometry, and the use of traditional techniques for Physical and Chemicals testing of the samples, according to the needs of the company.

Finally, combinations of these materials made with the pozzolan, which is currently used in the factory, in order to determine the pozzolanic activity present in combinations and observing their behavior when subjected to rupture strength tests after manufacture cement to laboratory scale with each of these combinations of materials. We show the experimental results, their conclusions and recommendations for the development of actual results and useful in decision making.



Keywords:

- Clays.
- Pozzolan.
- Pozzolanic Activity.
- Pozzolanic Cement.
- X-ray Diffractometry.
- X-Ray Fluorescence.
- Cement Grinding.



ÍNDICE

DEDICATORIA	12
AGRADECIMIENTO	13
ÍNDICE.....	1
I. ABSTRACT	8
II. INTRODUCCIÓN	14
III. REVISION DE LA LITERATURA.....	16
CAPITULO I: ANTECEDENTES HISTÓRICOS	17
1. Marco Teórico	17
1.1. Reseña Histórica de Compañía Industrias Guapán S.A.....	17
1.2. Antecedentes Teóricos	21
1.3. Términos y Definiciones	27
1.4. Descripción general del proceso de fabricación de cemento	29
CAPITULO 2: ARCILLAS Y PUZOLANAS USADAS EN LA.....	42
FABRICACIÓN DE CEMENTO	42
2.1. Arcillas: Generalidades	42
2.1. Puzolanas: Generalidades.....	49
2.2. Principales yacimientos de arcillas y puzolanas en la región.	52
IV. MATERIALES Y METODOS.	55
CAPITULO 3: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS PARA ANÁLISIS FÍSICO- QUÍMICO E INSTRUMENTAL	56
3.1. Extracción, recolección y preparación de muestras.....	56



3.2. Análisis químico de arcillas y puzolanas por el método de espectrometría de fluorescencia de Rayos X.....	62
3.3. Activación de las arcillas y puzolanas	78
3.4. Actividad puzolánica	80
3.5. Análisis Físicos	85
3.6. Análisis Químicos	135
V. RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS.....	143
CAPITULO 4: RESULTADOS	144
4.1. Análisis y Evaluación de datos experimentales	144
4.2. Análisis económico de los resultados obtenidos en la etapa de experimentación	153
4.3. Análisis de resultados y factibilidad del estudio	159
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	162
CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	163
VII. BIBLIOGRAFÍA.	166
VIII. ANEXOS	167



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, César Antonio Negrete Martínez, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Químico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

César Negrete M.
0104713292

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Yo, César Antonio Negrete Martínez, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

César Negrete M.
0104713292

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Andrés Esteban Delgado Vallejo, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Químico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Andrés Delgado V.
0105299499

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Andrés Esteban Delgado Vallejo, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Andrés Delgado V.
0105299499

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

**“EVALUACIÓN DEL USO DE ARCILLAS Y PUZOLANAS EN LA ETAPA DE
MOLIENDA DE ACABADO PARA LA FABRICACIÓN DE CEMENTO
PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP”**

Autores:

Andrés Esteban Delgado Vallejo

César Antonio Negrete Martínez

Director: Ing. Fernando Lloret

Cuenca – Ecuador

2012



DEDICATORIA

Andrés E. Delgado V.

A Dios que siempre está conmigo y me ha regalado en el camino de la vida, personas a las que amo, quiero y respeto; las cuales han sido, son y serán por siempre, el mayor éxito que jamás soñé alcanzar, porque les debo todo lo que soy como persona. También te agradezco Padre; por prestarme unos años esa fuerza para conseguir mis metas (Aida).

A mis padres, por ser el pilar fundamental de mi vida.

A mis hermanas, por brindarme su apoyo incondicional.

A Fernanda, por estar a mi lado en cada momento.

César A. Negrete M.



AGRADECIMIENTO

Nuestro sincero agradecimiento a Dios por el regalo de la vida y por permitirnos culminar con éxito esta etapa de nuestras vidas; de igual manera agradecemos a todas las personas que de manera directa o indirecta, hicieron posible el desarrollo de este trabajo: a la Universidad de Cuenca, a la Facultad de Ciencias Químicas, a la Escuela de Ingeniería Química, a nuestros maestros y maestras, en especial al ingeniero Fernando Lloret, quien con su sabiduría, experiencia, empeño y responsabilidad supo guiarnos para alcanzar la culminación de esta meta. Agradecemos también a la Compañía Industrias Guapán S.A. por la oportunidad, apertura y facilidades prestadas para el desarrollo de este estudio; en especial, al equipo de profesionales del Departamento de Calidad a cargo del ingeniero Patricio Ruiz, que sin su apoyo no hubiese sido posible el desarrollo de este tema en tan prestigiosa Empresa.



I. INTRODUCCIÓN

El uso adecuado de las materias primas dentro de una empresa garantiza el óptimo funcionamiento en las actividades de producción que se realicen y por supuesto, la consecución de las metas y objetivos de producción que se planteen al inicio. Además de garantizar el funcionamiento óptimo de la producción, se debe asegurar que las materias con las que se trabaja sean de la máxima calidad posible, pero a la vez de que sean poco costosas y tengan una buena rentabilidad para la empresa. Al referirnos a materias primas debemos asimilar que se trata de todos los materiales que son usados en una industria como fuente principal para la obtención de los productos que en una empresa se comercializan, acordes con una serie de normas y parámetros sujetos a un control estricto de la calidad, ya que de ello dependerá el crecimiento financiero de la empresa.

Al intentar usar o sustituir un nuevo material en un proceso de producción se debe tener la certeza de que esta nueva materia no afectará en lo más mínimo el producto final y al contrario, debe mejorar ciertos parámetros o circunstancias que en el proceso actual no alcancen su punto óptimo de funcionamiento. Esta sustitución o implementación de nuevos recursos está encaminada a mejorar las propiedades del producto final, del proceso o de la utilidad generada al producir el producto con las nuevas características.

La facilidad que actualmente se presta en la tecnología para métodos de análisis físico – químicos a nivel de laboratorio, ha comenzado una carrera de mejoramiento continuo en los procesos de producción a nivel mundial, reduciendo el tiempo y costo de los análisis, sin dejar de lado los métodos tradicionales que siempre serán útiles cuando no se cuente con la tecnología adecuada. Desde esta perspectiva, la industria del cemento ha incrementado de manera provechosa las posibles materias primas que se pueden utilizar en la producción, así como también los métodos y procesos empleados.



Actualmente en varios países cementeros del mundo se están utilizando materiales minerales abundantes en el medio, de bajo costo de extracción y transporte, como alternativa para la sustitución parcial de la puzolana en el cemento Portland Puzolánico Tipo IP; de esta manera se busca reducir costos de producción e incrementar las utilidades de las empresas, lo que genera una mayor prosperidad en sus trabajadores y con el menor impacto ambiental para las zonas cementeras.



II. REVISION DE LA LITERATURA.



CAPITULO I: ANTECEDENTES HISTÓRICOS

1. Marco Teórico

1.1. Reseña Histórica de Compañía Industrias Guapán S.A.

1.1.1. Aspectos Legales y Constitucionales

La constitución de la Compañía Industrias Guapán sucede el 18 de julio de 1955 con un capital social de 25`000.000,00 de sucres. En un inicio, sus accionistas fueron la Caja de Seguros Social – hoy Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS)-, Banco Nacional de Fomento (BNF), Centro de Reconversión Económica del Austro (CREA) y los Consejos Municipales de Azogues, Biblián y Cuenca. En el año 1969 el IESS adquiere las acciones del resto de los accionistas a excepción del BNF. A la fecha, del total de la composición del capital social, el 99,98% le corresponde al IESS y el 0,02% al BNF.

En el año 1962 se inicia la construcción de las instalaciones de la compañía. Las actividades productivas arrancan en 1965 con una capacidad de 200 Toneladas Métricas Diarias (TMD), en 1966 se amplía su capacidad a 250 TMD. Frente a la creciente demanda del producto y a los óptimos resultados alcanzados, en 1992 con tecnología de la compañía norteamericana Fuller Company se inician las actividades productivas de la nueva línea con capacidad de producción en clinker de 1.100 TMD.

1.1.2. Estructura Orgánica

Actualmente Industrias Guapán está constituida por la Junta General de Accionistas y su respectivo directorio; dirigida por la Gerencia General, Gerencia de Planta, las direcciones Administrativas – Financieras y a su cargo las respectivas superintendencias, departamentos y secciones; todos a responsabilidad de un departamento de Auditoría Interna, tal como se muestra en el siguiente diagrama:

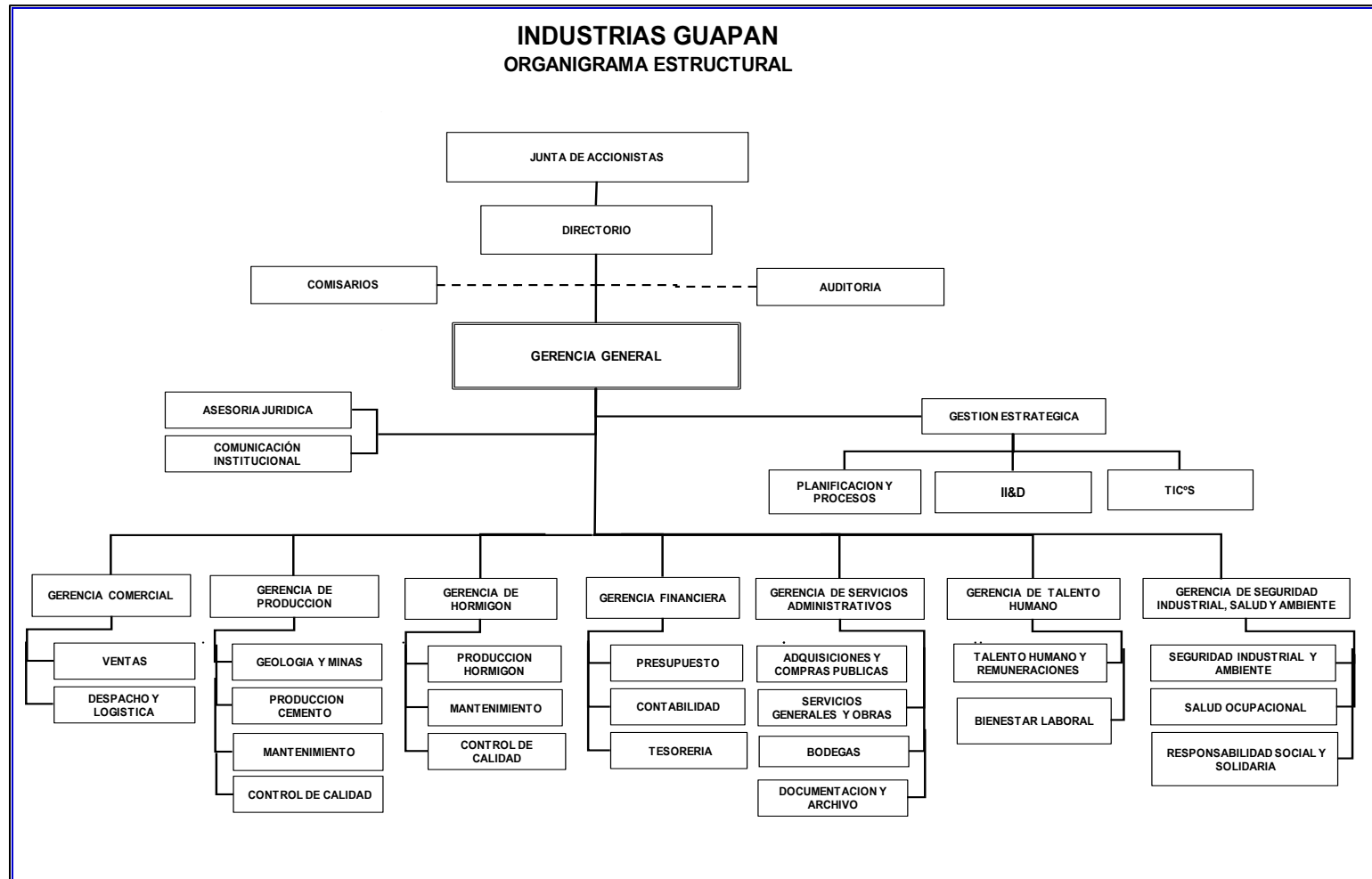


Figura 1.1. Organigrama General de la Compañía Industrias Guapán S.A.
Fuente: Gerencia de Talento Humano de la Compañía Industrias Guapán S.A.

1.1.3. Identidad Corporativa

Misión

"Producimos cemento y derivados de alta calidad, lo hacemos con equidad, responsabilidad social, solidaria y ambiental, procurando agregar valor y satisfacción para nuestros clientes".

Visión

"Aspiramos a mantenernos como una empresa competitiva, sustentable, respetuosa del hombre y la naturaleza y enfocada a cimentar el desarrollo nacional".

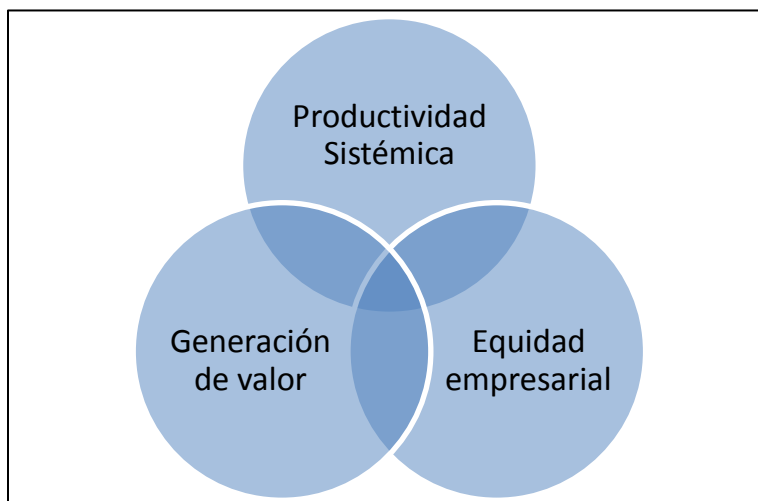
Valores Empresariales



Fuente: Gerencia Estratégica: Plan Estratégico 2012-2015 Industrias Guapán S.A. 2011

1.1.4. Ejes Estratégicos

Industrias Guapán S.A. define los Ejes Estratégicos de la empresa, entendidos éstos como las directrices que guían la ejecución de acciones y la toma de las decisiones más relevantes, para asegurar la razón misma de la empresa:



Sobre la base de los Ejes Estratégicos se definieron los Objetivos Estratégicos; es decir, los logros que la empresa debe alcanzar. A continuación una relación de los ejes y los objetivos estratégicos de la empresa para los próximos cuatro años.

#	EJE ESTRATÉGICO	OBJETIVOS ESTRATÉGICOS
I	Productividad sistémica basada en innovación y eficiencia energética (7)	1.1 Asegurar nuevas reservas y provisión de calizas, puzolanas y áridos hasta el primer cuatrimestre de 2012. 1.2 Incrementar la capacidad productiva de la planta en por lo menos un 15% en el 2012. 1.3 Mejorar la eficiencia operativa de la planta actual en un 5%. 1.4 Incrementar la capacidad instalada en la molienda de cemento en un 10%. 1.5 Diversificación de productos derivados del cemento. 1.6 Optimizar la matriz energética de la Compañía a través de la ejecución de un proyecto de uso del gas y de la energía fotovoltaica. 1.7 Instalar una nueva línea de producción de clinker y cemento.

II	Equidad empresarial y responsabilidad social, solidaria y ambiental.(8)	2.1 Implementación de la nueva estructura organizacional. 2.2 Implementar un sistema de gestión del talento humano para satisfacción del cliente interno. 2.3 Fortalecer las relaciones con los grupos de interés claves: proveedores, distribuidores, comunidades y gobiernos locales. 2.4 Implementar el Plan de Responsabilidad Social, Solidaria Empresarial. 2.5 Fortalecimiento de la gestión de aprovisionamiento de bienes y servicios. 2.6 Implementar un Sistema Integrado de Gestión por resultados 2.7 Construcción de nuevo edificio de la planta. 2.8 Análisis e implementación de la remuneración variable.
III	Satisfacción y generación de valor para los clientes (3)	3.1 Implementar un sistema efectivo de comunicación y relacionamiento con el cliente interno. 3.2 Incrementar la participación del mercado nacional. 3.3 Lanzamiento y posicionamiento de la nueva imagen corporativa.

Tabla 1.1. Ejes Estratégicos – Objetivos Estratégicos Compañía Industrias Guapán. S.A.

Fuente: Gerencia Estratégica: Plan Estratégico 2012-2015 Industrias Guapán S.A.- 2011-

1.1.5. Política de Calidad

“Industrias Guapán produce Cemento Portland Puzolánico de alta calidad, mediante un modelo de gestión y mejoramiento continuo que tiene como objetivo asegurar la total satisfacción de sus clientes, el cuidado del medio ambiente y el desarrollo de sus recursos, la comunidad y el país”¹.

1.2. Antecedentes Teóricos

Breve Historia del Cemento

Cualquier sustancia que aglutine materiales puede considerarse como cemento. En construcción el término “cemento” se refiere a aquellos agentes que se mezclan con agua para obtener una pasta aglutinante.

El hombre desde el inicio de su existencia, ha tratado de mejorar sus condiciones de vida y conseguir comodidad, para ello ha mantenido una constante búsqueda de elementos y materiales que le posibiliten efectuar construcciones que le permitan hacer realidad su propósito.

¹ POLÍTICA DE CALIDAD, Industrias Guapán S.A. 2008 Azogues – Ecuador, <http://www.industriasguapan.com.ec>



El ligante más antiguo con características cementicias encontrado, data de 7.000 años AC, descubierto en 1985, durante la construcción de la carretera Yiftah El en Galilea.

Los egipcios, griegos y romanos usaron materiales cementicios naturales sometidos en algunos casos a tratamientos térmicos imperfectos, siendo comunes los morteros elaborados en base de cal.

Los romanos aproximadamente en el año 200 AC perfeccionaron los materiales cementicios al mezclar cal hidráulica con una ceniza volcánica extraída cerca de Pozzuoli², y al material obtenido lo denominaron “*opus caementicium*.”

Con este material posteriormente llamado Cemento Romano, fabricaron hormigón con resistencias de hasta 5 mega pascales (MPa) con el cual construyeron sus famosos monumentos.

El Cemento Portland

El cemento romano fue utilizado para las construcciones hasta el siglo XVIII. A partir de 1750 se inician investigaciones de mezclas calcinadas de caliza y arcilla. En 1812, Louis Joseph Vicat, químico francés, inició investigaciones acerca de las condiciones que daban origen a la condición hidráulica en base de pruebas de cocción de calizas y arcillas, obteniendo un producto que se endurecía bajo el agua al que lo llamó Cal Hidráulica; en 1818 publicó “Recherches Experimentales” y en 1828 “Mortiers et Ciments Calcaires”. En estos trabajos se da la pauta en la fabricación de cemento por medio de la mezcla de calizas y arcillas.

Para el año 1824, Joseph Aspdin, constructor de Leeds Inglaterra, patentó un material pulverulento que, mezclado con agua, se endurecía y formaba un material de color similar a la roca muy utilizada en construcción que se obtenía de la isla de

² Pozzuoli, Ciudad italiana situada a los pies del volcán Solfatara perteneciente al sistema volcánico de los Campos Flegreos, <http://bayofnaples.altervista.org/es/pozzuoli.html> (22/04/2012, 16:32)



Portland al sur de Inglaterra, lo llamó Cemento Portland. A partir de esta investigación, en especial desde el año 1825, aparecen las primeras fábricas en Inglaterra. En 1850 se instalan las primeras fábricas de cemento en Alemania y Francia y en los Estados Unidos se empieza a fabricar cemento en 1870.

En América Latina la industria del cemento llega en los albores del siglo XX. En 1901 una pequeña fábrica es instalada en Guatemala, en 1906 se instala en México una planta con una producción de 20.000 toneladas/año y en 1908 empieza a operar la primera planta de cemento de Sudamérica en Chile.

En Ecuador la primera fábrica la construyó en Guayaquil el Ingeniero José Rodríguez Bonín (Industrias y Construcciones) la que inició su producción en junio de 1923 con 3.000 toneladas/año, con la marca “Cóndor”.

El cemento Portland ha tenido un gran desarrollo y actualmente es uno de los materiales industrializados de construcción de mayor consumo en el mundo, tanto que en el año 2005 la producción mundial llegó a 2.270 millones de toneladas.

La industria del Cemento en el Ecuador

Como se mencionó anteriormente, la industria del cemento en Ecuador se inicia en el año 1923 con la instalación de la planta “Industrias y Construcciones”. Actualmente en el país existen cuatro compañías encargadas de la producción de cemento, dos de ellas son privadas mientras que las dos restantes pertenecen a instituciones del estado ecuatoriano. A continuación se muestra una tabla resumen con la ubicación de cada una de las fábricas:

EMPRESA	UBICACIÓN	PLANTA
Cemento Chimborazo C.A.	Riobamba	San Juan Chico
HOLCIM Ecuador S.A.	Guayaquil	Cerro Blanco
	Latacunga	San Rafael
Industrias Guapán S.A.	Azogues	Guapán
LAFARGE Cementos S.A.	Otavalo	

Tabla 1.2. Empresas cementeras en Ecuador

Fuente: Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Concreto

A continuación se muestra la ubicación geográfica de cada una de las industrias mencionadas en la Tabla 1.2.



Figura 1.2. Ubicación geográfica de las Plantas de Cemento en el Ecuador.

Fuente: Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Concreto

Todas las industrias nacionales antes mencionadas, proporcionan el 100% del cemento gris que en el Ecuador se consume, siendo el cemento Portland IP elaborado bajo Norma INEN 490 (ASTM C595), el que presenta mayor demanda, cementos puros Tipo I y II, así como por desempeño HE se los puede obtener bajo

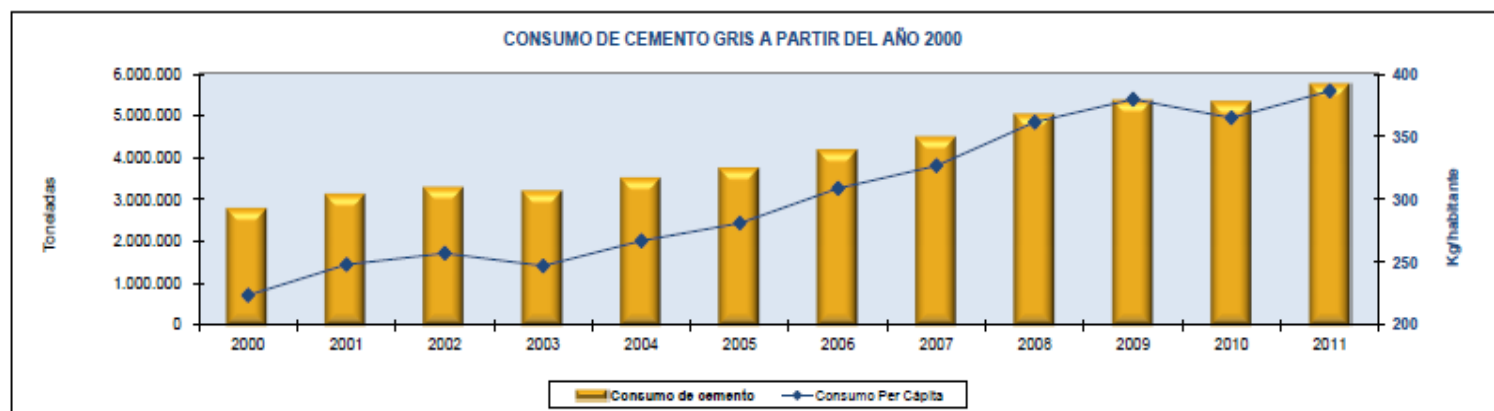
pedido, mientras que cemento blanco y otros especiales se importan.

En el siguiente cuadro se presentan el crecimiento de mercado y el consumo per cápita para los años 2000 a 2011.

CONCEPTO	UNIDAD	AÑO											
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Población	Habitantes	12.299.120	12.479.924	12.660.728	12.842.578	13.026.891	13.215.089	13.408.270	13.605.485	13.805.095	14.005.449	14.483.499	14.765.927
Consumo de cemento	Toneladas	2.750.232	3.096.678	3.255.461	3.171.681	3.478.169	3.715.500	4.141.009	4.447.070	4.991.248	5.318.935	5.287.126	5.705.731
Consumo Per Cápita	Kg/habitante	224	248	257	247	267	281	309	327	362	380	365	386

Tabla 1.3. Crecimiento del consumo/consumo per cápita entre los años 2000 - 2011.

Fuente: Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Concreto



Cuadro 1.1. Crecimiento del consumo a partir del año 2000 - 2011.

Fuente: Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Concreto

Para el año 2006 la industria nacional copó su capacidad para producir Clinker, mas no así su capacidad de molienda, motivo por el cual a partir de ese año se lo importa para suplir la demanda nacional.

El histórico de la participación en el mercado por empresa a partir del año 2000 al 2009 se muestra a continuación en la siguiente tabla:

AÑO	EMPRESA				IMPORTADO (*)	TOTAL
	HOLCIM	LAFARGE	GUAPÁN	CHIMBORAZO		
2000	1.657.790	569.288	316.794	200.638	5.700	2.750.210
2001	1.937.572	614.311	289.981	233.369	21.450	3.096.683
2002	2.033.455	627.406	302.299	247.521	44.782	3.255.463
2003	1.947.597	634.070	332.028	242.586	26.884	3.183.165
2004	2.192.185	640.866	404.200	232.819	8.100	3.478.170
2005	2.422.542	665.644	392.352	234.962	0	3.715.500
2006	2.754.605	731.812	424.720	229.871	0	4.141.009
2007	3.019.218	788.947	410.935	227.561	409	4.447.070
2008	3.336.146	954.714	416.775	283.540	74	4.991.248
2009	3.480.298	1.061.221	430.931	346.485	0	5.318.935

(*) EL CEMENTO GRIS IMPORTADO AQUI REPORTADO, CORRESPONDE ÚNICAMENTE AL DE USO GENERAL, NO SE INCLUYEN CEMENTOS ESPECIALES NI CEMENTO BLANCO.

Cuadro 1.2. Histórico de la participación en el mercado por empresa a partir del año 2000 al 2009.

Fuente: Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Concreto

En base a los datos mostrados en las tablas y cuadros anteriores, se espera que la tendencia continúe incrementándose para el consumo de cemento a nivel nacional, de manera que este estudio sea de útil aplicación y proyección para los años futuros en la compañía objeto de estudio.

1.3. Términos y Definiciones

Cemento Portland de escoria de altos hornos³

Cemento hidráulico, consistente de una mezcla íntimamente molida de clinker de cemento Portland y escoria de altos hornos granulada o una mezcla íntima y uniforme de cemento Portland y escoria de altos hornos granulada fina, en la cual la cantidad del componente escoria, está dentro de límites especificados.

³ CEMENTO PORTLAND DE ESCORIA DE ALTOS HORNOS, NTE INEN 151:2010, Tercera Revisión, 2010 – 01.



Cemento Hidráulico⁴

Cemento que fragua y endurece por reacción química con agua y es capaz de hacerlo aun bajo el agua.

Cemento Portland Puzolánico⁵

Cemento hidráulico consistente en una mezcla íntima y uniforme de cemento Portland o cemento Portland de escoria de altos hornos y puzolana fina producido por molido conjunto de clinker de cemento Portland y puzolana; por una mezcla de cemento Portland o cemento Portland de escoria de altos hornos y puzolana finamente dividida o una combinación de molido conjunto y mezclado, en el cual, la cantidad del componente puzolana está dentro de límites especificados.

Cemento Portland⁶

Cemento hidráulico producido por pulverización de clinker, consistente esencialmente de silicatos cálcicos hidráulicos cristalinos y que usualmente contiene uno o más de los siguientes elementos: agua, sulfato de calcio hasta 5%, piedra caliza y adiciones de proceso.

Clinker de Cemento Portland⁷

Clinker parcialmente fusionado por un proceso de calcinación que consiste predominantemente de silicatos cálcicos hidráulicos cristalinos.

Escoria de Altos Hornos⁸

Producto no metálico, consistente esencialmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases que es producido en fundición simultánea con minerales de hierro en un alto horno.

⁴ CEMENTO HIDRAULICO, NTE INEN 151:2010, Tercera Revisión, 2010 – 01.

⁵ CEMENTO PORTLAND PUZOLANICO, NTE INEN 151:2010, Tercera Revisión, 2010 – 01.

⁶ CEMENTO PORTLAND, NTE INEN 151:2010, Tercera Revisión, 2010 – 01.

⁷ CLINKER DE CEMENTO PORTLAND, NTE INEN 151:2010, Tercera Revisión, 2010 – 01.

⁸ ESCORIA DE ALTOS HORNOS, NTE INEN 151:2010, Tercera Revisión, 2010 – 01.



Puzolana ⁹

Material silíceo – aluminoso, el cual por sí mismo posee poco o ningún valor cementante, pero que en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

1.4. Descripción general del proceso de fabricación de cemento

Proceso de fabricación

Existen dos métodos para la fabricación de cemento: Método por Vía Húmeda y Método por Vía Seca, estando actualmente el primero de ellos en desuso.

En términos generales, el proceso de fabricación del cemento por vía seca se puede describir de la siguiente manera:

Las materias primas necesarias para la producción de cemento (carbonato cálcico, sílice, alúmina y mineral de hierro) se extraen normalmente de la roca caliza, la creta, la pizarra arcillosa o de la arcilla.

Todas estas materias primas se extraen de las canteras mediante voladuras y otros sistemas. A continuación, se muelen y transportan hasta la fábrica donde se almacenan y homogenizan.

La molienda de la materia resulta en un polvo sumamente fino conocido como crudo. Éste se precalienta y cuece en el horno donde alcanza temperaturas de hasta 1.500°C, para ser posteriormente enfriado mediante corrientes de aire. Así se produce el clinker¹⁰, el material básico requerido para la producción de todos los cementos.

⁹ PUZOLANA, NTE INEN 151:2010, Tercera Revisión, 2010 – 01.

¹⁰ CLINKER, El clinker es el ingrediente principal del cemento. Estos gránulos endurecidos se obtienen de la combustión de la mezcla de, aproximadamente, un 80% de piedra caliza y un 20%

Con el fin de regular el fraguado del cemento se añade una pequeña cantidad de yeso (3-5%) al clinker para, a continuación, volver a moler la mezcla y obtener "cemento puro". Durante esta fase se pueden añadir junto al yeso, otros materiales minerales diferentes, de origen natural o industrial, denominados "adiciones del cemento", causantes de proporcionar al mismo, propiedades específicas como reducida permeabilidad, mayor resistencia a los sulfatos y a entornos agresivos, mayor facilidad de trabajabilidad o acabados de mejor calidad.

Por último, el cemento es almacenado en silos hasta su envío, en granel o ensacado, según las necesidades de cada cliente.

Dentro de la Compañía Industrias Guapán S.A. se sigue el proceso descrito a continuación:

Yacimientos

La provisión de materia prima se realiza de los depósitos mineralizados con alto contenido de carbonato de calcio de las canteras Rescate y Gretha Piedad, ubicadas en el cantón Santiago de Méndez (Provincia de Morona Santiago) a 175 km de las instalaciones industriales, que constituyen las reservas principales de Industrias Guapán, así como de varios y pequeños yacimientos calcáreos ubicados en las provincias de Azuay (Sinincay, Ricaurte) y Cañar: canteras Mangán y Guapán (ésta última que está en fase de culminación y cierre de explotación).

de arcilla a temperaturas muy elevadas. El cemento se obtiene al triturar el clinker y, en algunos casos, añadir una serie de aditivos.



Figura 1.3. Imagen de las Minas de Méndez.
Fuente: Compañía Industrias Guapán S.A.



Figura 1.4. Imagen de la Mina Mangan (izquierda) y Mina Guapán (derecha).
Fuente: Compañía Industrias Guapán S.A.

Explotación

Para los procesos de explotación se utiliza la Tecnología TECNEL y TECS, herramientas que permiten realizar voladuras con un mínimo riesgo de proyecciones, con la menor onda sísmica y de bajo nivel sonoro.

Se dispone de un moderno equipo de explotación compuesto de perforadoras, Atlas Copco ECM580, Tamrock DHA500S y Tractores CAT D8., excavadoras CAT 330 CL.



Figura 1.5. Imagen de Métodos y Maquinaria de Explotación.

Fuente: Compañía Industrias Guapán S.A.

Transporte

El transporte de las diversas materias primas se realiza mediante una flota estratégica de transporte y carguío compuesta por excavadoras CAT 330CL, excavadoras CAT 320CL, cargadoras frontales CAT 966 y camiones de volteo.

Trituración

El proceso industrial se inicia con la reducción del tamaño de la materia prima procedentes desde las canteras, partiendo de rocas con dimensiones de 1000mm hasta reducir a un 95% de su tamaño, logrando pasar por una malla de 25mm. Mediante un triturador de martillos marca Williams Patent Crusher & Pulv. Co, con una capacidad para procesar, en una sola pasada, hasta 350 Toneladas métricas por hora (TMPH).



Figura 1.6. Imagen de Triturador de Martillos marca Williams Patente Crusher & Pulv. Co.

Fuente: Compañía Industrias Guapán S.A.

La materia prima entra con una humedad del 8%. El área de producción tiene un funcionamiento de 8 horas diarias durante 5 días a la semana.

Prehomogenización

Es el área destinada para el almacenamiento del material triturado y la homogeneidad del producto en elaboración, mediante el apilamiento y la recuperación.



Figura 1.7. Imagen del Prehomogenizador Compañía Industrias Guapán S.A.

Fuente: Compañía Industrias Guapán S.A.

La maquinaria que realiza la prehomogenización está dentro de un almacén circular, marca Pohlig - Heckel - Bleichert, que consta de un apilador con capacidad de 600 TMPH, almacenando el material en dos pilas según el Método Chevron¹¹ y un recuperador con capacidad de alimentación de 200 TMPH.

¹¹ MÉTODO CHEVRON DE APILAMIENTO, Es la forma más usual de apilamiento longitudinal. El material se va depositando a lo largo del vértice longitudinal de una pila piramidal, formando capas individuales que se depositan unas sobre otras en forma de pares o de techumbres. Todas las capas contienen la misma cantidad de material (el espesor de la capa va disminuyendo), la cual depende del caudal del dispositivo de descarga, así como de la velocidad con que recorre la pila.

Molienda de Crudo

El objetivo de esta área es el de dosificar y preparar la materia prima de acuerdo a los requerimientos físico-químicos para la elaboración del clinker de cemento.



Figura 1.8. Imagen del Molino de Bolas marca Fuller Co.

Fuente: Compañía Industrias Guapán S.A.

Se realiza la molienda hasta una finura tal que el retenido en el tamiz de 200 ASTM (75 micras) sea menor al 15 %, con una humedad del producto menor al 0,5 %. El equipo principal es un molino de bolas horizontal, marca Fuller Co con capacidad de 90 TMPH, consta de una cámara de admisión y secado y dos cámaras de molienda con descarga central periférica y un circuito de recirculación de material con separadores de tamaño de partícula tanto estáticos como dinámicos.

Homogenización

El producto de la molienda de crudo es transportado por aerodeslizadores hasta dos silos de homogenización, que tienen una capacidad de 2340 m³ en total. Tienen la función de realizar la mezcla de la harina cruda para mejorar la

homogeneidad del material. Este trabajo se lo realiza mediante la inyección de aire comprimido a impulsos para generar un movimiento interno del polvo. En la parte inferior de los silos de homogenización se ubican los silos de almacenamiento con una capacidad de tratar 4500 m^3 y el sistema de dosificación para la alimentación al horno con una capacidad de hasta 100 TMPH.



Figura 1.9. Imagen del Silo Norte de almacenamiento y homogenización de harina cruda.

Fuente: Compañía Industrias Guapán S.A.

Precalcinación

En los procesos de fabricación de cemento por vía seca se aprovecha el calor que escapa a la salida del horno rotativo para la preparación del crudo y se utiliza con mayor provecho en el precalentamiento del material de alimentación.

Existen muchos dispositivos que se destinan a facilitar una mayor área de contacto entre el material crudo y los gases calientes con el fin de promover un

intercambio de calor. Cuando el horno es alimentado con crudo seco, los dispositivos interiores levantan una gran cantidad de polvo que es arrastrado por los gases a la salida del horno. Este polvo puede recuperarse por medio de un ciclón como un simple intercambiador de calor. A partir de este principio, los intercambiadores de calor han evolucionado con el fin de mejorar el rendimiento térmico de la cocción. Estos dispositivos se sitúan al exterior del horno propiamente dicho, junto a su extremo de alimentación por donde salen los gases calientes que, a su paso por el calentador, transmiten su calor al material de alimentación y lo secan si es necesario.

En la vía seca, consistiendo la alimentación del horno en un material pulverizado y seco como el crudo, la función de secado carece de importancia, lo importante es el precalentamiento que se puede lograr por medio de dispositivos adecuados.

Existen diferentes procedimientos y sistemas de precalentadores y precalcinaidores, así tenemos los Precalentadores de Parrilla, que consiste en una parrilla móvil sobre la cual avanza un lecho de material crudo granulado (nódulos) formado por humedecimiento del polvo crudo en un aparato nudulizador adecuado. Este método de fabricación de cemento se denomina sistema Lepol, que deriva de su inventor el Dr. Lellep, y de Polysius, firma constructora de las primeras parrillas.

La Compañía Industrias Guapán S.A. utiliza un precalentador de ciclones de 7 etapas el cual trabaja a una temperatura de 700°C en la parte inferior y una temperatura de 300°C en la parte más alta de la torre de precalcinaación.

El material fino ingresa por la parte superior de la torre mediante un sistema de aerodeslizadores y se va calentando a medida que desciende por cada etapa hasta llegar a séptima etapa donde se precalcina a los 700°C justo antes de ingresar al horno de Clinkerización.

Clinkerización y Enfriamiento

Es el área fundamental del proceso de fabricación de cemento; el equipo principal es el horno rotativo, marca FULLER Co. con una capacidad de producción de 1.100 TMPD de clinker para cemento. Tiene un diámetro de 4,11m y 57,91m de longitud, revestido interiormente con material refractario. El horno se apoya en tres bases con aros y rodillos que permiten el movimiento y es accionado por un motor de 250 HP de velocidad variable.



Figura 1.10. Imagen del Precalentador de Ciclones marca Polysius (centro), Horno Rotativo marca Fuller Co (izquierda) y Silo de Almacenamiento Norte (derecha).

Fuente: Compañía Industrias Guapán S.A.

La zona de enfriamiento consiste en un enfriador Polysius de parrillas, el cual funciona por medio de ventiladores de aire.

Molienda de Acabado o Molienda de Cemento

La molienda de cemento o acabado es una parte final del proceso de

fabricación. En esta área se dosifican y muelen el clinker, yeso y puzolana, su equipo principal es el molino de bolas, marca FULLER Co, con un diámetro de 3,66m y una longitud total de 11,28m, es de tipo horizontal dividido en dos cámaras: la primera de 3,66m de longitud en la que se realiza la molienda gruesa y la segunda de 7,62m en la que se realiza la molienda fina.



Figura 1.11. Imagen de Molino de Bolas marca Fuller Co.

Fuente: Compañía Industrias Guapán S.A.

El molino tiene un diseño con descarga axial, es accionado por un motor eléctrico de 3000HP con una garantía de producción de 60 TMPH de cemento, con una superficie específica media de 4300 cm²/g (Blaine). La clasificación del producto se realiza mediante un circuito dinámico con un separador de partículas por aire marca F.L. Smidth, modelo OSEPA.

Empaque y Despacho del Cemento

Para la venta de cemento a los consumidores se dispone de un área totalmente moderna de empaque. La calidad en el peso está certificada por balanzas digitales y controladas mediante sistemas electrónicos con tecnología de punta.



Figura 1.12. Imagen de Ensacadora Rotativa Haver Boecker.

Fuente: Compañía Industrias Guapán S.A.

El área está equipada con dos líneas completas de enfundado del cemento con ensacadoras rotativas Haver Boecker con 8 bocas cada una y una capacidad de enfundar 2500sacos/h cada máquina. Con servomecanismos autómatas que permiten un flujo continuo y estable en la emisión de sacos. Paralelamente para el despacho a granel se disponen de dos sistemas de alimentación para carros cisterna. El despacho está controlado a la salida del vehículo de transporte por una moderna báscula electrónica de 80 toneladas de capacidad y certificada por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

En la siguiente figura se puede apreciar, en resumen, el proceso de fabricación de cemento por vía seca:

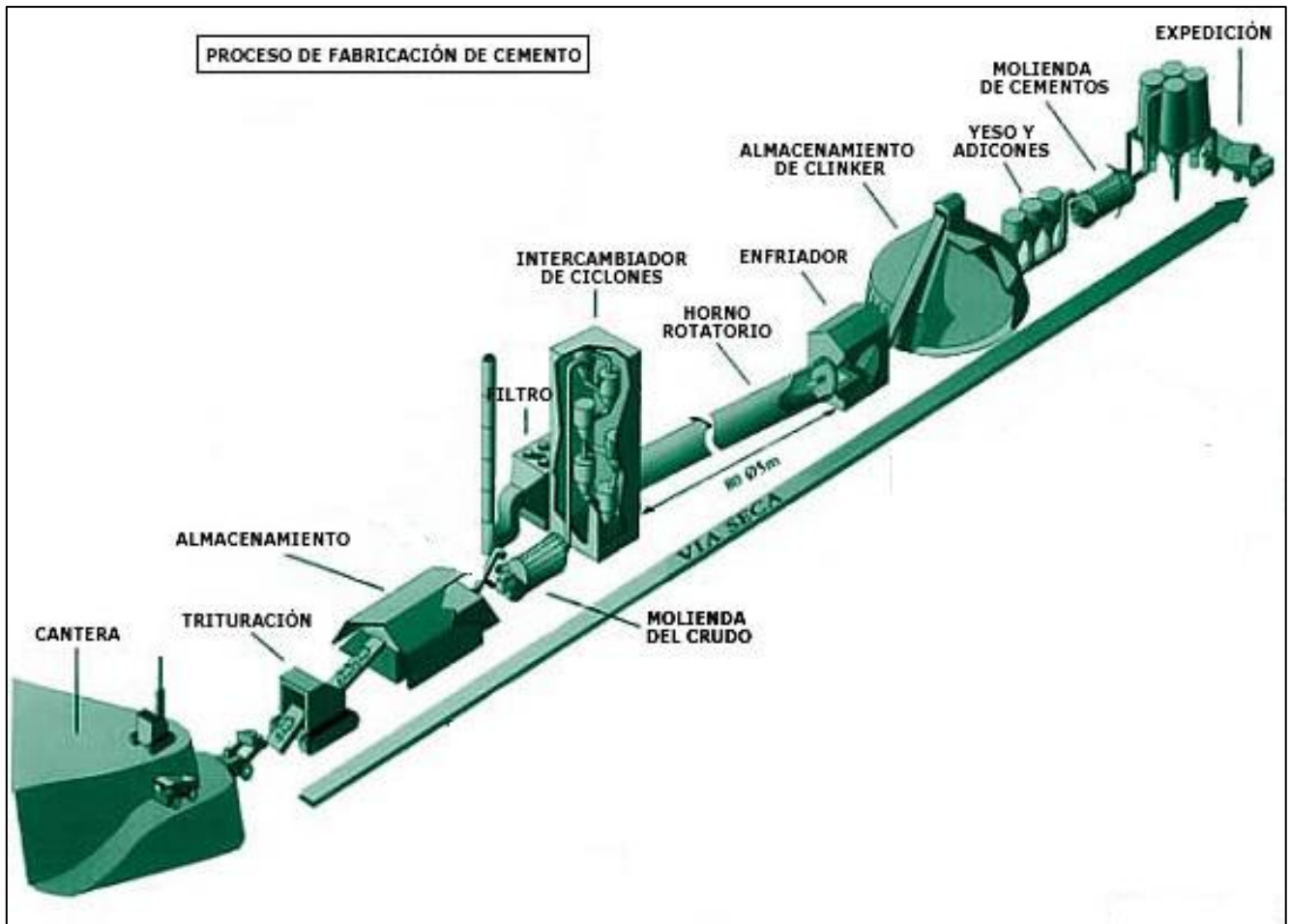


Figura 1.13. Proceso de Fabricación de Cemento por vía seca.

Fuente: Caillon Rouge / Roger Rivet.

1.4.1. Proceso de Molienda de Cemento

La molienda de cemento o molienda de acabado es la etapa final en el proceso de fabricación de cemento. En esta etapa se reduce de tamaño, a polvo fino, la combinación entre el clinker obtenido en la etapa de calcinación, yeso en una proporción del 3 al 5%, puzolanas hasta un 15% y otros materiales extras denominados adiciones que pueden ser:

- Escorias de alto horno.
- Humo de sílice.



- Pozolanas naturales.
- Cenizas volantes.
- Caliza.
- Polvos recuperados del proceso.
- Arcillas.

Esta etapa es muy importante para el proceso, ya que de ella depende la calidad final con la que será expedido el producto. Debe garantizarse la combinación adecuada en proporción y calidad de las adiciones para no afectar a las características finales del cemento, cumpliendo con normas preestablecidas para control de su calidad.

La Compañía Industrias Guapán utiliza actualmente en esta etapa, una combinación de clinker producido en la fábrica, clinker importado desde China, yeso proveniente de la región y puzolana proveniente desde Latacunga.

Este estudio pretende determinar la factibilidad de remplazar hasta un 10% de la puzolana traída desde Latacunga por materiales de menor costo y yacimientos cercanos a la fábrica, además de otros materiales los cuales son el objetivo fundamental de este estudio, sin disminuir la calidad del producto, abaratar costos de producción y transporte cumpliendo con los parámetros y normas establecidas.

CAPITULO 2: ARCILLAS Y PUZOLANAS USADAS EN LA FABRICACIÓN DE CEMENTO

2.1. Arcillas: Generalidades

Las arcillas son aquellas sustancias terrosas formadas principalmente por aluminosilicatos con materia coloidal y fragmentos de rocas, que generalmente se hacen plásticas cuando están húmedas y pétreas por la acción del calor.

La arcilla no es un mineral sino un agregado de minerales y de sustancias coloidales que se han formado mediante la desintegración química de las rocas aluminicas. Está compuesta principalmente por sílice, alúmina y agua; conteniendo también otras sustancias como fragmentos de rocas, de óxidos hidratados de hierro, álcalis y materiales coloidales. En esencia los minerales de la arcilla son silicatos de aluminio. En algunas arcillas los elementos alcalinos se presentan como constituyentes; en otras el magnesio, el hierro o ambos elementos sustituyen total o parcialmente al aluminio. La mayoría de las arcillas se han formado por la desintegración de rocas con un alto contenido de alúmina, a pesar de que algunas son producto del metamorfismo. Estas últimas aparecen sólo en pequeñas cantidades.

Los constituyentes químicos esenciales de los minerales de la arcilla varían no sólo en cantidad sino también en el modo en que se combina o se presentan en los diferentes minerales. Los minerales arcillosos más importantes se encuentran en el grupo de las caolinitas y de las montmorillonitas. Las arcillas esenciales de los sedimentos arcillosos son el resultado de la meteorización de rocas ígneas y metamórficas. En condiciones de escasa precipitación, el magnesio de las rocas ígneas máficas (ricas en magnesio y hierro) permanece en la zona de meteorización y la arcilla producida es montmorillonita. Si la precipitación es considerable, se efectúa una lixiviación completa de la roca, el magnesio es separado y el producto de la meteorización es caolinita. A partir de una roca ígnea

ácida se origina illita y montmorillonita en condición de meteorización, con tal que ocurra retención de potasio y magnesio, pero se formaría caolinita de prevalecer una lixiviación excesiva.

Según el origen se pueden distinguir dos categorías de arcillas:

- Residuales
- Transportadas

Dentro de estas últimas se encuentra una subclasificación que se describe a continuación:

- a) Marinas
- b) Lacustres
- c) Aluviales
- d) Estuarias
- e) Deltaicas
- f) Glaciales
- g) Eólicas

Por consiguiente, desde el punto de vista geológico, las arcillas tienen una distribución prácticamente universal; a pesar de ello los yacimientos de alta calidad son difíciles de localizar.

La composición y su naturaleza determinan el uso y el valor de la arcilla. El cuarzo disminuye la plasticidad y la retracción, y contribuye a hacerla refractaria. La sílice en forma coloidal aumenta la plasticidad. La alúmina la hace refractaria. El óxido de hierro, al igual que el feldespato, disminuye la temperatura de fusión, actúa como fundente y también es un poderoso agente colorante.

En resumen, las arcillas son productos de meteorización de silicatos de los metales alcalinos y alcalinotérreos, en particular de los feldespatos¹² y micas¹³. Para la industria cementera la arcilla o materia arcillosa es solo una fuente de SiO_2 finamente dividido, por vía química o mecánica con cantidades de Al_2O_3 y Fe_2O_3 deseadas para la sinterización¹⁴. Es decir, importa más su composición química, particularmente el módulo de silicatos, el contenido de álcalis, cuyo contenido debe ser mantenido dentro de límites adecuados.

2.1.1. Estructura de las Arcillas

Los filosilicatos como todos los demás grupos de silicatos, están constituidos por una unidad estructural Si-O que es un tetraedro de coordinación con el Si en el centro y cuatro oxígenos en cada uno de los vértices del tetraedro. Los tetraedros son pirámides de base triangular, con todas sus caras iguales, (cuatro triángulos equiláteros).



Figura 2.1. Dibujo esquemático de la Estructura de las Arcillas.

Fuente: Grim, 1968.

¹² FELDESPATOS, Se aplica el nombre genérico de feldespatos a un grupo de minerales constituidos por aluminio-silicatos de calcio, sodio, potasio o bario. (<http://www.sabelotodo.org/rocas/feldespato.html>, 16/05/2012, 12:45)

¹³ MICAS, Las micas son minerales pertenecientes a un grupo numeroso de silicatos de alúmina, hierro, calcio, magnesio y minerales alcalinos. <http://www.mineral-s.com/mica.html>, 16/05/2012, 12:58)

¹⁴ SINTERIZACIÓN, Método industrial utilizado para obtener cuerpos sólidos compactando polvos metálicos o cerámicos. http://www.rmateriales.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=109:sinterizado&catid=40:n6&Itemid=65, 16/05/2012, 20:54.

El tetraedro Si-O se encuentra eléctricamente descompensado (el Si aporta cuatro cargas positivas frente a las ocho cargas negativas de los cuatro oxígenos de los vértices), por lo que ha de unirse a otros cationes para neutralizar las cargas. En estas estructuras cada vértice de la cara basal pertenece a dos tetraedros vecinos (cada oxígeno se coordina a dos silicios), dando una capa de tetraedros.

Los tetraedros, en el caso de los filosilicatos, comparten su vértice superior con un octaedro de coordinación, con Al y/o Mg en el centro y un O y/u OH en los seis vértices. Los octaedros son bipirámides con su plano ecuatorial cuadrado y y todas sus caras triángulos equiláteros iguales.

Los octaedros en estas estructuras se disponen apoyados en una de sus caras.

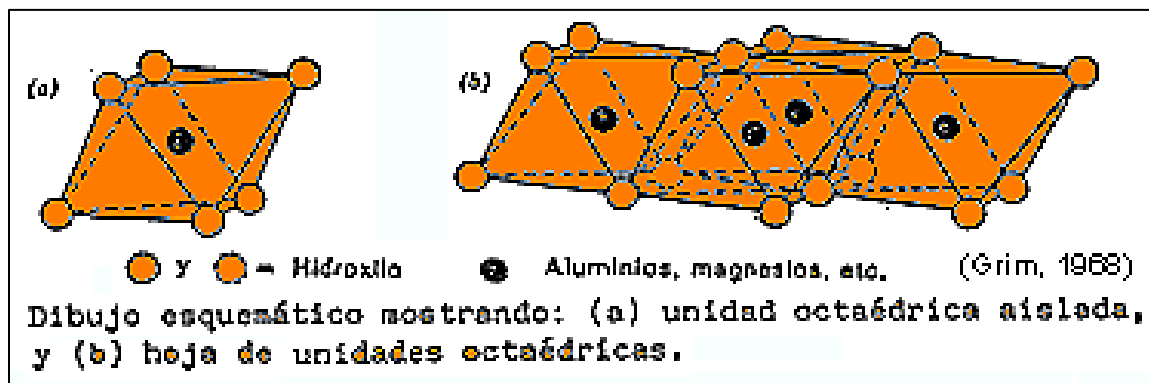


Figura 2.2. Dibujo esquemático de la Estructura octaédrica de las Arcillas.

Fuente: Grim, 1968.

Estos octaedros se encuentran también descompensados eléctricamente (dos cargas positivas si el catión octaédrico es el Mg o tres si se trata de Al, frente a las 12 posibles cargas negativas que pueden aportar los seis vértices). Para neutralizarse se comparten entre sí sus vértices formando una capa de octaedros (además se unirán a los silicios de la capa tetraédrica).

Las capas de tetraedros y octaedros se acoplan dando láminas que al repetirse forma la estructura cristalina.

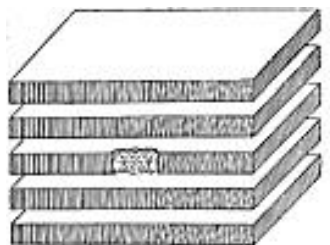


Figura 2.3. Representación de la estructura laminar cristalina de las arcillas.

Fuente: <http://edafologia.ugr.es/imaginter/arcillas/arcillas.htm> (2012).

2.1.2. Tipos de Arcillas

A las arcillas se las puede clasificar en los siguientes grupos de minerales:

a) Grupo del Caolín:

- Caolinita $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Dickita $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Nacrita $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Halloysita $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

b) Grupo de la Montmorillonita:

- Montmorillonita $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + n\text{H}_2\text{O}$
- Beidellita $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
- Nontronita $(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
- Saponita $2\text{MgO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

c) Grupo de las arcillas que contienen metales alcalinos o alcalinotérreos:

- Micas arcillosas, incluida la illita $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, en cantidades variables.

Los minerales del grupo del caolín se distinguen por su diferente riqueza en

SiO_2 , así como por su estructura cristalográfica y sus propiedades ópticas. La denominación de caolinita se aplica al mineral caolín puro.

2.1.3. Aplicación en la Fabricación de Cemento

Para la fabricación de cemento las arcillas se mezclan en un porcentaje de hasta el 10% de la mezcla total, junto con puzolanas hasta un 15%, sulfato de calcio hidratado hasta un 5% y el 70% restante es el clinker procedente de la calcinación de carbonatos de calcio.

La principal característica de las arcillas junto con las puzolanas es la capacidad que poseen de endurecer al contacto con el agua; con agregados pétreos y agua crean una mezcla uniforme, maleable, plástica, que fragua y se endurece tomando una consistencia pétrea.

La arcilla se introduce a la mezcla del clinker, yeso y puzolanas en la etapa de **Molienda de Acabado o Molienda de Cemento**, previamente secada, activada y molida a una finura adecuada según lo indica la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 152:2010 para requisitos del Cemento Portland Pozolánico Tipo IP.

Comúnmente las arcillas usadas en la fabricación de cemento poseen las siguientes características físico-químicas que pueden variar según su procedencia:

- **Superficie Específica.**- Las superficies específicas de los minerales de la arcilla son:

Mineral	Superficie Específica m^2/g
Caolín	aproximadamente 15
Halloysita	aproximadamente 43
Ilita	aproximadamente 100
Montmorillonita	aproximadamente 800

Tabla 2.1. Superficie específica de los minerales de arcilla.

Fuente: Manual Tecnológico del Cemento, Duda, 1977.

- **Peso Específico.**- Respectivamente los pesos específicos son:

Mineral	Peso Específico
Caolín	2,60-2,68
Halloysita	2,00-2,20
Illita	2,76-3,00

Tabla 2.2. Peso específico de los minerales de arcilla.

Fuente: Manual Tecnológico del Cemento, Duda, 1977.

- **Punto de Fusión.**- El punto de fusión de los minerales de arcilla se hallan entre los límites de 1150°C hasta 1785°C. (Duda, 1977, pág. 2).
- **Composición Química.**- La composición química de las arcillas varía desde aquellas que se aproximan a los minerales puros de la arcilla hasta las que contienen agregados de hidróxido de hierro, sulfuro de hierro, arena, carbonato de calcio, etc. El hidróxido de hierro es el componente colorante más frecuente de las arcillas. También pueden prestarle distintas coloraciones las sustancias orgánicas. La arcilla sin impurezas es blanca. La principal fuente de álcalis en los cementos es el componente arcilloso del crudo. A continuación se indica la composición química de diferentes arcillas que se utilizan en la fabricación de cemento:

Componente (%)	Arcilla 1	Arcilla 2	Arcilla 3	Arcilla 4
Pérdida al rojo	7,19	8,67	10,40	6,40
SiO ₂	67,29	62,56	52,30	60,10
Al ₂ O ₃	8,97	15,77	24,70	18,00
Fe ₂ O ₃	4,28	4,47	6,10	8,20
CaO	7,27	4,80	4,40	0,80
MgO	1,97	1,38	0,10	0,20
SO ₃	0,32	-	1,10	3,80
K ₂ O	1,20	2,35	0,80	2,50
Na ₂ O	1,51			
Suma	100	100	99,9	100

Tabla 2.3. Composición química de arcillas usadas en la fabricación de cemento.

Fuente: Manual Tecnológico del Cemento, Duda, 1977.



2.1. Pozolanas: Generalidades

Según la ASTM (American Society for Testing and Materials) las pozolanas naturales son materiales sílicos o sílico-aluminosos que por sí solos poseen poco o nulo valor cementante, pero finamente divididos en presencia de humedad, reaccionan químicamente con la portlandita (hidróxido de calcio Ca(OH)_2) a temperatura ordinaria para formar compuestos con propiedades cementantes.

Las características de las pozolanas provienen de su granulometría o estado de subdivisión, tienen formas diversas y sus dimensiones varían de acuerdo a su naturaleza y estructura; pero generalmente son materiales muy finos y de menor densidad que el clinker Portland. La humedad de la pozolana puede variar de un 3% a 15% dependiendo el lugar y la profundidad además de las condiciones climáticas en el momento de su extracción.

Las pozolanas son de fácil molienda, la misma que se facilita cuando están completamente secas.

El color de las pozolanas varía de acuerdo al lugar y con los contaminantes que posean; de esta manera pueden tener colores como: el gris oscuro, blanco lechoso, blanco amarillento, rojizo, verdoso, amarillo rojizo, etc.

La densidad aparente está comprendida entre $(0.8 - 1.4) \frac{g}{cm^3}$ y su densidad real puede variar entre: $(2.3 - 2.8) \frac{g}{cm^3}$ lo que significa que tiene una densidad mayor a la del cemento Portland.

Cuando a las pozolanas se las muele finamente, aumentan su eficacia ya que **pueden fijar la cal del cemento Portland de manera más rápida, esto debido a la sílice y la alúmina que contienen** (efecto Pozolánico o actividad pozolánica). Las pozolanas permiten reducir la expansión de los cementos y hormigones, también mejoran la resistencia aplicando un tratamiento térmico a base de vapor saturado.

Poco se sabe acerca de las funciones desempeñadas por los componentes menores, sin embargo la presencia de sílice, alúmina, hierro y de álcalis parece ser muy favorable para la formación de silicatos o aluminatos cálcicos hidratados estables y solubles.

La composición química de estos materiales varía de un sitio a otro, siendo en unos casos muy rica en sílice y alúmina y en otros tan pobres en estos elementos que para su utilización es necesario llevar a cabo una activación artificial.

En términos promedio podemos poner un rango en el cual la composición química de las puzolanas podrá fluctuar entre los parámetros descritos a continuación:

Elemento	% Sobre la masa total
Dióxido de Silicio (SiO_2)	65%
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	14%
Óxido de Calcio (CaO)	5%
Óxido Férrico (Fe_2O_3)	4%
Óxido de Potasio (K_2O)	3%
Otros Óxidos	9%

Tabla 2.4. Composición química de puzolanas.

Fuente: http://www.puzolana.com.ar/que_es_la_puzolana.html (2012).

2.1.1. Estructura de las Puzolanas

El material de las erupciones volcánicas compuesto principalmente de aluminosilicatos, es enfriado bruscamente, lo cual resulta en la formación de materiales con estructura desordenada o vítrea con minerales pobremente cristalinos.



2.1.2. Tipos de Puzolanas

Existen puzolanas tanto naturales como artificiales.

- **Puzolanas de Origen Natural.-** Las puzolanas de origen natural son derivadas de erupciones volcánicas, excepto las tierras diatomáceas, las cuales son formadas por silicatos amorfos hidratados, derivados de los esqueletos de microorganismos acuáticos. Entre algunos tipos de puzolanas naturales encontramos: las cenizas volcánicas, piedra pómez, tobas y obsidiana.

Además de estas puzolanas se encuentran también las rocas o suelos en las que el constituyente silíceo contiene ópalo¹⁵, ya sea por la precipitación de la sílice de una solución o de los residuos de organismos de lo cual son ejemplos las tierras de diatomeas, o las arcillas calcinadas por vía natural a partir de calor o de un flujo de lava.

- **Puzolanas de Origen Artificial**
 - Cenizas volantes, las cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral (lignito), fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.
 - Arcillas activadas o calcinadas artificialmente, por ejemplo residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800 °C.
 - Escorias de fundición, principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos. Estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.

¹⁵ ÓPALO, es un mineraloide del grupo IV (óxidos), según la clasificación de Strunz relacionado con los cuarzos, aunque no es un cuarzo, y que se caracteriza por su brillo y astillabilidad. Hasta 2012 fue considerada una especie mineral válida por razones históricas; no obstante, no es un verdadero mineral, ya que está formado por cristobalita y/o tridimita más sílice amorfa. (<http://www.uned.es/cristamine/gemas/grupos/silice/opalo.htm>, 10-06-12, 13:10).

- Cenizas de residuos agrícolas: la ceniza de cascarilla de arroz, ceniza del bagazo y la paja de la caña de azúcar. Cuando son quemados convenientemente se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina, cuya estructura depende de la temperatura de combustión.

2.1.3. Aplicación en la fabricación de cemento

El cemento Pozolánico se produce a partir de mezclar íntimamente y moler en un molino de bolas hasta fino polvo una mezcla de hidrato de cal y puzolana, con una proporción promedio de 70% de puzolana y 30% de cal. El material producido requiere tener una finura similar a la del cemento Portland ordinario (250-300 m²/kg ensayo Blaine).

Las ventajas que ofrece la puzolana al ser molida con el clinker de cemento se detallan a continuación:

- Mayor durabilidad del cemento.
- Mejora en la resistencia frente al agua de mar.
- Mejor defensa ante los sulfatos y cloruros.
- Aumento en la resistencia a la compresión.
- Incremento de la impermeabilidad por la reducción de grietas en el fraguado.
- Disminución del calor de hidratación.
- Mejora en la resistencia a la abrasión.
- Aumenta la resistencia del acero a la corrosión.
- Menor necesidad de agua.

2.2. Principales yacimientos de arcillas y puzolanas en la región.

Los principales yacimientos, fuente de estudio, que se encuentran en la región se describen a continuación en la siguiente tabla:

Mineral	Composición Química Básica	Mina	Lugar de Procedencia	UBICACION GEOGRAFICA		Distancia de la Fábrica (Km)
				LONGITUD	LATITUD	
Arcilla	$(Al,Si)_3O_4$	Guapán	Guapán	2°43'9.51" S	78°53'12,11" O	1
Arcilla	$(Al,Si)_3O_4$	Taday	Taday	2°37'39.93" S	78°41'8,71" O	16
Caolín	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	Tierra Blanca	Quillopungo	2°28'9.12" S	78°37'11,01" O	8
Puzolana	$SiO_2 \cdot Al_2O_3$	Sr. Malo	Challuabamba	2°51'8.28" S	78°53'25,42" O	19
Puzolana	$SiO_2 \cdot Al_2O_3$	Guapán	Deleg	2°47'17.10" S	78°55'32,88" O	24,5
Puzolana	$SiO_2 \cdot Al_2O_3$	Latacunga	Latacunga	0°20'47.14" S	78°30'59,59" O	362
Arcilla	$(Al,Si)_3O_4$	Andina	Cuenca	2°53'33.03" S	78°57'32,21" O	40
Arcilla	$(Al,Si)_3O_4$	Andina	Cuenca	2°53'33.03" S	78°57'32,21" O	40

Tabla 2.5. Principales yacimientos de arcillas y puzolanas en la región.

Fuente: Departamento de Calidad Compañía Industrias Guapán S.A. (2012).

A continuación se muestran las imágenes de las minas pertenecientes a la Compañía Industrias Guapán, de las cuales se pretende extraer arcilla y puzolana respectivamente:



Figura 2.4. Yacimiento de arcilla Guapán (Azogues – Ecuador)

Fuente: Andrés Delgado – César Negrete (2012).



Figura 2.5. Yacimiento de puzolana Guapán (Déleg – Ecuador)

Fuente: Delgado – Negrete (2012).



III. MATERIALES Y METODOS.

CAPITULO 3: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS PARA ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO E INSTRUMENTAL

3.1. Extracción, recolección y preparación de muestras

El método de extracción, recolección y preparación de muestras para arcillas y puzolanas se describen a continuación según el procedimiento ISO 2000 P.CK-7.1-01 utilizado en el Sistema de Gestión de Calidad (2006) de la Compañía Industrias Guapán, que a su vez está basado en los procedimientos descritos en la norma NTE INEN 153:09 para cemento hidráulico: muestreo y ensayos, desarrollada por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).

TOMA Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS

PROPÓSITO.- Evaluar la composición química y humedad de la materia prima en cantera y halles.

ALCANCE.- Se aplica a los bancos de explotación en las canteras y halles de almacenamiento de materia prima.

DEFINICIONES:

- **Cuarteador.-** Es un equipo utilizado para sacar una muestra representativa de una determinada cantidad.
- **Muestra.-** Es una cantidad de material extraída al azar de un lote y representativa de la calidad del mismo.
- **Barreno:** Agujero realizado por la perforadora en un banco de explotación.

EQUIPO:

- Triturador de mandíbulas.
- Cuarteador.
- Bandeja para cuarteo.



- Tamiz.
- Recipiente para recolección de muestras.
- Fundas herméticas de polietileno Ziploc.

INSTRUCCIONES:

➤ **CANTERA Y HALLES:**

Se lleva a cabo muestreo cada vez que se requiera el mismo y será comunicada por el departamento de cantera.

Cuando se está realizando las perforaciones en la cantera, se toman muestras por cada barreno que se introduzca. Las muestras tomadas en perforación deben ser de alrededor de 250 gramos por cada barreno (1kg mínimo) y éstas deben ser debidamente codificadas.

De los halles de almacenamiento se toma de igual manera una cantidad aleatoria representativa de cada sector del hall de aproximadamente 1kg (ver figura 3.1.).



Figura 3.1. Toma de muestra en el hall de almacenamiento de puzolana de la Compañía Industrias Guapán

Fuente: Delgado – Negrete (2012).

Las muestras son almacenadas en fundas herméticas de polietileno e identificadas con una tarjeta adhesiva que se coloca en la parte frontal de la funda y que contiene la siguiente información (ver figura 3.2.):

- Nombre de la muestra.
- Fecha de extracción
- Observaciones.

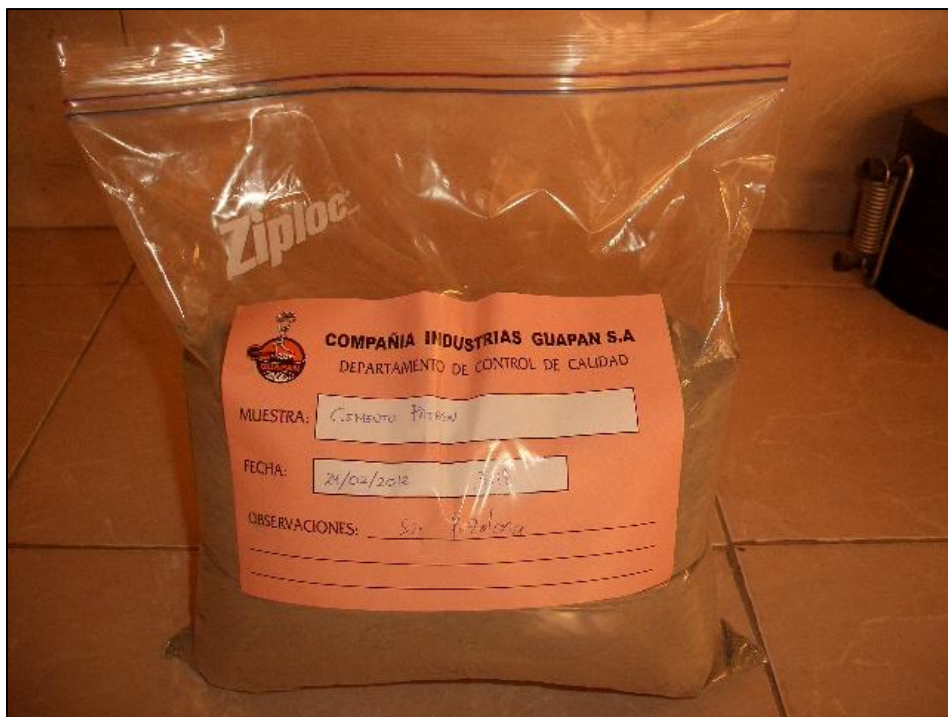


Figura 3.2. Almacenamiento de Muestra de cemento Patrón.

Fuente: Delgado – Negrete (2012).

Finalmente las muestras son llevadas al laboratorio para continuar con su preparación para ser analizadas.

Con las muestras en el laboratorio se procede a su reducción de tamaño en un triturador de mandíbulas (Figura 3.3.), luego a cuartearlas (Figura 3.4.) y a extraer una cantidad aproximada de 0.6Kg de muestra total.



Figura 3.3. Triturador de mandíbulas.

Fuente: Delgado – Negrete (2012).



Figura 3.4. Equipo cuarteador para muestras.

Fuente: Delgado – Negrete (2012).

Se mezcla todo el material cuarteado y se almacena en fundas herméticas de polietileno Ziploc correctamente rotuladas (ver Figura 3.2.).

Se coloca el 50% del material cuarteado (300g) en una bandeja de acero y se procede a secar hasta peso constante en una estufa térmica (Figura 3.5.) entre los 200°C y 250°C hasta peso constante.



Figura 3.5. Estufa térmica para desecación de muestras húmedas.

Fuente: Delgado – Negrete (2012).

Finalmente se procede a triturar el material secado en un vibromolino (Figura 3.6.) por un lapso de 60 segundos hasta obtener un material particulado fino (polvo), el cual se almacena en una funda hermética de polietileno Ziploc correctamente rotulada. De esta forma se obtienen dos lotes de muestra: el primero que contiene el material original sin tratamiento y el segundo con el material seco y molido.



Figura 3.6. Vibromolino para trituración de muestras secas.

Fuente: Delgado – Negrete (2012).

Con el lote de muestra en estado original se procede a determinar la humedad según el procedimiento P.CK - 7.1- 02 que se describe más adelante, en el punto de los análisis físicos.

3.2. Análisis químico de arcillas y puzolanas por el método de espectrometría de fluorescencia de Rayos X

El análisis clásico de silicatos y puzolanas, con sus requerimientos de tiempo, es todavía en nuestros tiempos la base segura para determinaciones cuantitativas. Sin embargo, hoy en día han sido complementados o sustituidos por varios procedimientos **espectrográficos** más rápidos, por ejemplo, por métodos colorimétricos y complexométricos, en los que se determina el viraje de un color; en el segundo caso, la complexona es el soporte del color.

Los álcalis son determinados en el **fotómetro de llama**. El sodio y el potasio emiten, llevados a la llama de un mechero, una radiación en el tramo de la luz visible y del ultravioleta, que se puede medir con una célula fotoeléctrica después de su paso por un filtro para los colores. Utilizando un **espectrógrafo** pueden ser determinados otros componentes secundarios o trazas de otros elementos. En resumen, el funcionamiento de un espectrógrafo consiste en que la radiación



secundaria producida por una llama, un arco eléctrico o por un sólido sometido al impacto de una radiación incidente sobre él, es descompuesta, mediante un prisma o un retículo en la serie de las longitudes de onda presentes en la radiación estudiada. En las líneas o bandas se puede reconocer la presencia de los distintos elementos y su cuantía. El **cuantómetro**, que trabaja con arco eléctrico, y probetas en forma de briquetas, no se ha abierto paso a causa de las dificultades de la evaporación. Según P. Holler y Slickers, el **método de la banda** permite aplicaciones, con éxito, para la determinación de Si, Al, Ca, Mg, Fe y también en los crudos para cemento. En ese método, la probeta de polvo es llevada en capa del espesor de una sola partícula sobre una banda larga y estrecha (tape, en inglés) y es expuesta con rapidez a chispas eléctricas producidas en un tramo de su desplazamiento.

El análisis por fluorescencia a rayos Roentgen (AFR), se apoya en la aplicación de rayos Roentgen y de rayos de electrones muy ricos en energía. En ellos, la radiación secundaria o radiación por fluorescencia emitida por la muestra, es descompuesta en las diferentes longitudes de onda en un cristal analizador a través de su reflexión e interferencia, cuya intensidad, lo mismo que en el análisis por reflexión de los rayos Roentgen, puede ser medida en un aparato Geiger - Müller provisto de contador de centelleos o por un contador proporcional de flujo de gases, en forma de impulsos por segundo, ambos susceptibles de ser registrados. La diferencia entre el análisis óptico y el análisis espectral a rayos Roentgen, se deduce de la figura 3.7, aplicada por F. W. Locher y W. Richartz (1962). En el análisis espectral óptico, como muestra la parte izquierda de la figura, son excitadas solamente las capas externas del átomo de calcio, representado en ella.

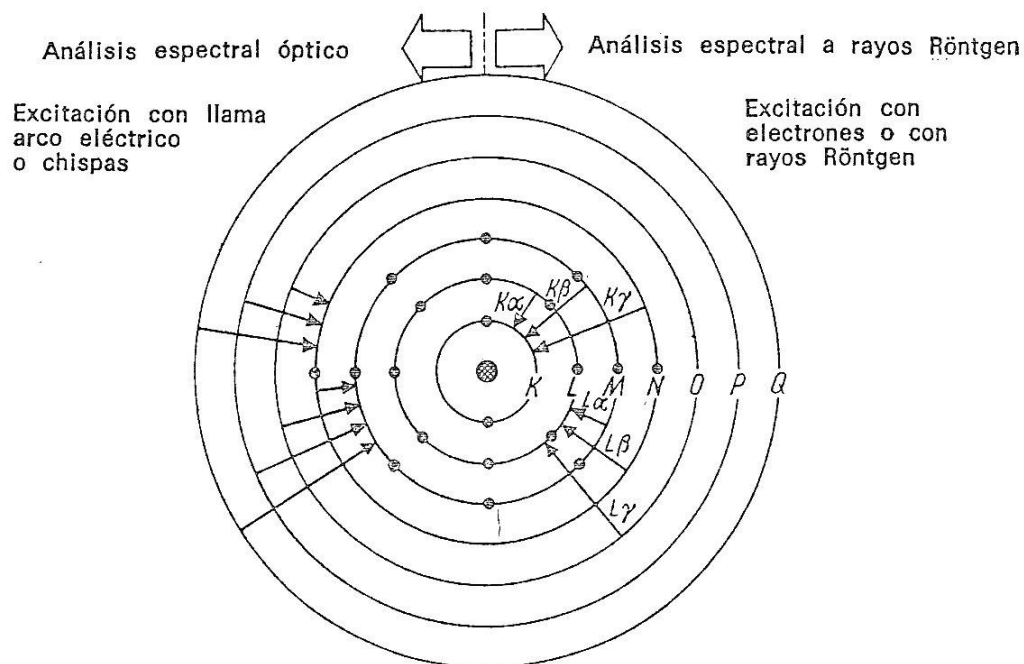


Figura 3.7. Origen del espectro – exterior –, a la izquierda e – interior –, a la derecha, de un átomo de calcio representado en forma esquemática. Según Licher – Richartz (1962).

Fuente: Cemento, fabricación, propiedades y aplicaciones. Phil Fritz Keil (1973).

La radiación es relativamente pobre en energía, con longitudes de onda entre 8000 y 2000 Å o 0,8 hasta 0,2 μm . En el análisis espectral Roentgen, como muestra la parte derecha de la figura, la radiación rica en energía penetra hasta las capas más internas del átomo y suministra una radiación secundaria en el intervalo de longitudes de onda de 0,4 hasta 10 Å, o sea, de 0,04 hasta 1 nm.

En la tabla 3.1, en la que se muestran los distintos métodos del análisis espectral, figura también el de la espectroscopia del ultrarrojo, descrita por H. Lehmann y H. Dutz (1959), que hoy es llamada **espectroscopia en el infrarrojo**, abreviadamente espectroscopia IR, cuyas longitudes de onda se mueven en el infrarrojo próximo con 0,8 a 3 μm y de 3 a 30 μm en las bandas del infrarrojo medio, respectivamente. La pequeña energía de estos rayos excita al átomo en su totalidad, incluido el núcleo atómico con movimientos de rotación y de oscilación. Con él se puede determinar la presencia simultánea de grupos OH, H₂O y CO₂

libres y asociados. Lehmann y Dutz, con ayuda de los espectros IR, pudieron identificar las fases minerales del clinker, así como distinguir el βSC_2 y el γSC_2 . El tamaño de partículas de los productos de hidratación se extiende, en intervalo amplio, hasta los $100\text{\AA} = 10\text{nm}$, sin que por ello se pueda fijar, como por ejemplo en el yeso, una posición preferida para el agua. Lehmann y Dutz concluyen, partiendo también de la investigación termogravimétrica, en particular de la realizada sobre pequeñas probetas preparadas a presión, que la estructura cristalina no es responsable de la alta resistencia inicial de las probetas, aunque también haya que suponer que después de largo tiempo en condiciones favorables, se forman combinaciones bien cristalizadas los productos de hidratación del cemento aluminoso fundido, del Portland y los silicatos hidratados ceden el agua combinada, de modo continuo, desde los 150°C ; solamente en el Portland aparecen dos discontinuidades a los 465°C y a los 715°C .

Espectrografía		Abreviatura	Longitud de onda en la radiación medida				Mecanismo
			Intervalo en m	Límites en el intervalo			
				μm ¹	Å ²	nm	
Espectro Infrarrojo		IR	1E-05	de 30			Movimientos de rotación y oscilatorios de moléculas y grupos complejos.
	Espectro Ultrarrojo	UR ³					
	Infrarrojo medio y próximo			hasta 0,8			Idem.
Análisis Espectral Óptico			1E-07	de 0,8	8.000	800	Saltos electrónicos en las capas exteriores del átomo
	Fotómetro de Llama						
	Cuantómetro por arco eléctrico			hasta 0,2	2.000	200	
Análisis por Fluorescencia a Rayos Roentgen		RFA	1E-09	de	10	1	Saltos electrónicos en las capas interiores del átomo
				hasta	0,4	0,04	
¹ μ = 1E-6m, representado antes por μ, es el intervalo óptico-microscópico con aumentos hasta 1:2000. Poder de resolución de hasta 0,5μm.							
² Å = Ångstrom = 1E-10m, es la unidad para el intervalo reticular en los cristales (aumento hasta 1:150.000)							
³ Designación habitual antes; en la actualidad se palica solamente a las longitudes de onda más pequeña, más allá del violeta, región llamada ultravioleta.							

Tabla 3.1. Longitudes de onda y operación de los distintos métodos espectrográficos.

Fuente: Cemento, fabricación, propiedades y aplicaciones – Dr. Phil Fritz Keil (1973).

H. E. Schwiete y E. Niël (1965), han aplicado el espectrógrafo de IR para distinguir el yeso del semihidrato y de la anhidrita y también, con éxito, en el control de explotación del clinker y del cemento. Para una valoración cuantitativa,

las bandas que aparecen aproximadamente, de 2,8 a 6; de 8,5 a 9,2; así como de 15 a 17 μ m, son adecuadas las de los dos últimos grupos como muestra la Figura 3.8.

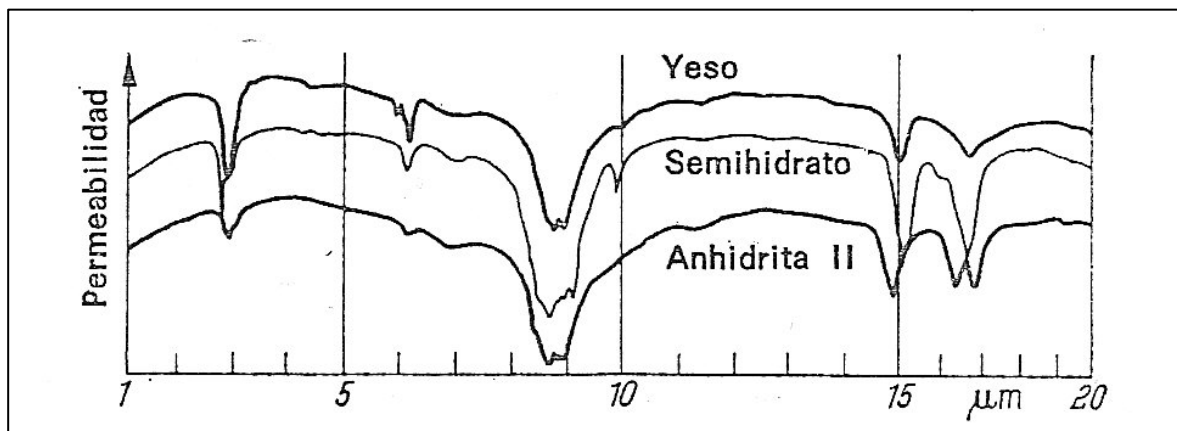


Figura 3.8. Diagrama de absorción en el espectro infrarrojo de los distintos grados de hidratación del sulfato cálcico.

Fuente: Cemento, fabricación, propiedades y aplicaciones – Dr. Phil Fritz Keil (1973).

En Estados Unidos el análisis IR sirve ante todo, para la identificación de aditivos en la tecnología del cemento y hormigón.

Los espectros de resonancia magnético-nuclear o de resonancia nuclear, abreviadamente espectros NMR, que implica el empleo de imanes muy potentes, es una forma particular de la espectroscopia de microondas. En él, el núcleo atómico es obligado a acomodar su spin al campo magnético homogéneo del exterior. Ocurrido esto se aplica un campo magnético variable de alta frecuencia y entonces se origina una resonancia característica por razón de la energía tomada y cedida después. Con ello se obtienen valores específicos para la absorción.

Según P. Seligmann (1968), los espectros NMR ofrecen un valor informativo superior a los espectros IR. El estado de combinación del agua evaporable hasta 70% de humedad relativa, corresponde aproximadamente al de la intercalada en las capas de la arcilla entumecida y el del agua de cristalización en algunos retículos cristalinos. Es claramente menos movable que el agua combinada químicamente que forma parte de tal retículo.



Análisis por Difracción a Rayos X

Los métodos por difracción a Rayos X se han empleado en las investigaciones del cemento con dos objetivos esencialmente diferentes. **Los espacios entre los planos y las intensidades de las líneas de los diagramas de difracción o difractogramas¹⁶ se han usado como medios de identificación de las fases cristalinas en las fusiones experimentales como en los clinker comerciales.** En relación con los métodos microscópicos, estos diagramas proporcionan los mejores medios que actualmente se pueden utilizar para tales identificaciones. El análisis de estos diagramas por diferentes métodos, se ha empleado también hasta cierto límite en el estudio de la estructura de los cristales en algunas fases.

La identificación completa de un compuesto cristalino en el microscopio, lleva implícito la medida de numerosas propiedades ópticas, lo que en el caso del cemento Portland no es siempre posible. Los cristales están por lo general, muy finamente divididos, a menudo en partículas demasiado pequeñas para permitir medidas satisfactorias. También a veces están rodeados de vidrio o contienen inclusiones. Por estas razones los exámenes microscópicos no han sido adecuados para identificar positivamente todas las fases y se han hecho indispensables métodos suplementarios.

Hace algunos años fue aplicado el método de difracción por rayos X por la PCA (Portland Cement Association) asociado al estudio del cemento Portland, y se resolvieron por este método una serie de problemas de constitución, que habían intrigado a los investigadores durante mucho tiempo.

Las consideraciones teóricas de este método se han estudiado en varios trabajos, en resumen se puede anotar que cuando un material pulverizado se somete a una emisión de rayos X y se fotografía el espectro resultante, se obtiene

¹⁶ DIFRACTOGRAMA, Representación gráfica que produce un difractómetro, que es un aparato de medida que analiza la estructura de un material a partir de la radiación que emana la muestra cuando hacemos que ésta interactúe con rayos X. Si el objeto analizado es amorfo o vítreo, es decir, no presenta ordenación interna, la muestra no producirá respuesta.



un diagrama de difracción (difractograma) que consiste en una serie de líneas en posiciones definidas que se miden generalmente desde un origen fijado y se registran como “espacios interplanares”. Cada compuesto químico cristalino tiene un diagrama de difracción característico que resulta ser siempre el mismo, esté presente el compuesto en estado puro o mezclado con otros componentes. Por este método también se puede distinguir formas cristalinas diferentes de la misma composición; así el $C_2S-\beta$ y $C_2S-\gamma$ tienen esquemas de difracción completamente diferentes.

El método de rayos X tiene limitaciones definidas muy explicables. Así, un diagrama de difracción depende de la disposición de los átomos de una sustancia en sus planos de cristalización. En una mezcla de dos componentes ocurre a menudo que algunas líneas de un diagrama coinciden con las de otro. De aquí, que cuanto mayor sea el número de componentes, mayor será la probabilidad de que hayan coincidencias de líneas. Sin embargo, tales coincidencias producen diferencias de intensidad en las líneas resultantes, de modo que la identidad del diagrama puede no resultar totalmente ininteligible.

Las limitaciones debidas a la concentración de un material tienen más importancia. Al disminuir la cantidad de una fase cristalina, disminuye la intensidad general del diagrama de ese compuesto. Primero desaparecen las líneas menos intensas del diagrama y después las más marcadas, hasta alcanzar cierta cantidad máxima del compuesto en que las líneas más intensas no pueden ya seguirse viendo. Bajo las condiciones más favorables se pueden identificar raramente cantidades de material menores de un 2 o 3 por ciento del total. Para determinar cantidades tan pequeñas de material, los cristales tendrían que estar bien desarrollados, tener una simetría muy regular y una estructura simple, y que preponderaran las líneas que no coinciden con las de los diagramas de los demás materiales también presentes. Estas condiciones se cumplen muy pocas veces, de modo que generalmente se necesitan mayores cantidades que las antes mencionadas para reconocer una fase. La presencia de una solución sólida se



revela generalmente por una ligera desviación en la posición de las líneas, proporcional a la concentración del soluto.

Las intensidades relativas de las líneas, tanto como sus posiciones, tiene un significado importante en la identificación de los compuestos. Si una línea de un diagrama de difracción tiene doble intensidad que otra del mismo diagrama, con esta relación se deduce si el compuesto está presente en estado puro o es una mezcla. En la mezcla de dos compuestos el diagrama de uno se superpone al del otro. La intensidad general de cada uno disminuye a causa de la dilución por el otro, pero las intensidades relativas de las líneas de ambos permanecen invariables.

Por tanto, el análisis de una muestra de un material desconocido depende de que se reconozcan, por su posición e intensidad relativas, las líneas del diagrama de difracción de un material puro en el de la muestra desconocida. De aquí que antes de que se deba comenzar ningún análisis, hayan de conocerse los diagramas de difracción de los compuestos puros que puedan estar presentes en la muestra. Son conocidos estos datos para la mayoría de los compuestos puros que intervienen en los sistemas óxidos del cemento Portland.

APENDICE I

Diagramas de difracción de rayos X de los componentes del clinker y de sus compuestos *

CaO (7)	SiO ₂ (7)	Al ₂ O ₃ -α (7)	Al ₂ O ₃ - (6)	Al ₂ O ₃ -γ (6)	MgO (6)	Fe ₂ O ₃ (6)
2,77 s	3,32 ss	3,49 m	2,82 s	2,86 m	2,43 w	2,69 ss
2,40 ss	2,45 w	2,56 s	2,69 ss	2,75 m	2,01 m	2,51 ss
1,700 ss	2,28 w	2,38 m	2,52 s	2,57 ww	1,483 ss	2,20 m
1,450 s	2,12 w	2,09 s	2,42 s	2,45 s	1,266 ss	1,837 ss
1,388 s	1,975 w	1,740 s	2,37 m	2,33 m	1,243 m	1,690 ss
1,201 m	1,815 s	1,603 ss	2,25 s	2,25 m	1,212 s	1,593 m
1,101 m	1,665 w	1,510 w	2,14 s	2,03 s	1,049 m	1,482 s
1,074 s	1,540 m	1,402 m	2,03 s	1,908 w	0,963 w	1,448 s
0,979 s	1,452 ww	1,374 s	1,936 s	1,800 w	0,939 s	1,344 ww
0,923 m	1,415 ww	1,234 s	1,834 m	1,624 ww	0,856 s	1,307 m
0,848 w	1,378 s	1,191 ww	1,743 w	1,541 m	0,806 w	1,255 m
0,811 m	1,286 w	1,149 ww	1,653 m	1,486 w	0,741 m	1,224 w
0,799 m	1,255 w	1,122 ww	1,594 s	1,447 w	0,698 m	1,186 m
0,757 m	1,228 w	1,100 w	1,569 s	1,388 s	0,662 m	1,161 m
0,723 m	1,199 w	1,078 w	1,484 m		0,631 m	1,136 m
0,693 ww	1,183 w	1,042 m	1,415 s		0,580 m	1,101 m
0,672 w	1,154 w	0,995 m	1,393 ss		0,559 m	1,052 m
0,666 w	1,081 w	0,993 ww	1,344 s			1,037 ww
0,641 w	1,044 ww	0,904 w	1,241 m			0,987 w
0,625 w	1,016 ww	0,854 w	1,208 w			0,960 m
0,582 w	0,991 ww	0,843 ww	1,170 ww			0,952 m
0,565 w	0,961 ww	0,828 w	1,153 ww			0,944 w
0,553 w	0,916 ww	0,806 ww	1,132 ww			0,907 w
0,549 ww	0,896 ww	0,796 w	1,050 w			0,876 m
0,535 ww	0,815 ww	0,761 ww	1,019 w			0,853 w
0,525 ww	0,791 ww	0,719 ww	0,992 w			0,844 m
0,522 ww		0,686 ww	0,967 w			0,838 m
0,510 ww		0,662 ww				0,805 w
		0,637 ww				0,760 m
		0,630 ww				
		0,616 ww				
		0,600 ww				
		0,578 ww				
		0,564 ww				

* Las intensidades de las líneas se indican como sigue: ss=muy fuerte, s=fuerte, m=media, w=débil, ww=muy débil, b=ancha.

612

LA QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND

(Continuación)

C ₂ S (2)	C ₂ S-α (4)	C ₂ S-β (2)	C ₂ S-γ (5)	C ₂ A (3)	C ₂ A ₂ (3)	KC ₂₃ S ₁₂ (8)
3,02 s	2,81 ss	3,80 w	4,31 w	4,07 m	3,77 m	2,75 ssb
2,940 w	2,70 ss	3,37 w	3,80 w	3,32 w	3,18 m	2,63 w
2,770 ss	2,218 m	3,03 wb	3,35 w	3,03 w	2,98 s	2,29 w
2,730 ss	1,945 s	2,870 w	3,00 s	2,83 w	2,67 ss	2,240 w
2,600 s	1,749 w	2,780 ss	2,88 w	2,77 w	2,55 m	2,185 m
2,435 ww	1,579 m	2,730 ss	2,74 ss	2,69 ss	2,44 s	2,043 m
2,320 m	1,559 m	2,610 s	2,61 w	2,57 ww	2,34 m	1,959 s
2,178 s	1,470 m	2,540 w	2,52 w	2,46 ww	2,180 s	1,805 w
1,975 m	1,350 m	2,440 m	2,45 w	2,400 w	2,055 w	1,789 w
1,932 m	1,217 w	2,400 m	2,33 w	2,375 w	1,943 s	1,717 w
1,825 w	1,164 w	2,278 m	2,19 w	2,270 w	1,906 w	1,632 ww
1,762 s		2,182 s	2,04 w	2,200 m	1,846 w	1,593 m
1,627 s		2,080 w	1,970 w	2,135 ww	1,800 ww	1,484 ww
1,532 mb		2,040 w	1,905 s	2,085 w	1,764 w	1,417 ww
1,487 s		2,020 w	1,800 m	2,033 w	1,728 m	1,370 wb
1,458 w		1,980 m	1,752 m	1,981 w	1,694 w	
1,390 ww		1,895 mb	1,690 w	1,947 w	1,660 s	
1,198 w		1,800 m	1,630 m	1,905 s	1,629 m	
1,162 wb		1,755 w	1,523 w	1,821 w	1,599 s	
1,132 wb		1,700 wb	1,490 w	1,785 ww	1,544 w	
1,090 wb		1,632 w	1,472 w	1,731 m	1,520 m	
1,020 ww		1,610 w	1,440 w	1,693 ww	1,493 w	
		1,575 ww	1,405 w	1,669 ww	1,472 m	
		1,548 ww	1,355 w	1,640 w	1,390 s	
		1,528 w	1,255 w	1,611 w	1,353 ww	
		1,482 w	1,235 w	1,554 ss	1,336 w	
		1,447 ww	1,160 w	1,512 ww	1,305 m	
		1,415 w	1,135 m	1,486 w	1,290 ww	
		1,393 ww	1,095 w	1,449 w	1,274 w	
		1,370 w	1,013 w	1,426 ww	1,260 w	
			0,960 w	1,404 w	1,234 w	
			0,895 w	1,360 w	1,207 w	
			0,830 w	1,354 s	1,187 ww	
				1,315 ww	1,171 w	
				1,262 ww	1,140 ww	
				1,231 w	1,110 m	
				1,204 s	1,091 w	
				1,165 w	1,084 w	
				1,155 ww	1,066 w	
				1,099 w	1,057 w	
				1,053 ww	1,048 ww	
				1,034 ww	1,031 w	
				1,017 s	1,017 w	
				0,998 ww	0,989 ww	
				0,966 ww	0,968 ww	
				0,897 m	0,927 w	
				0,850 ww	0,916 ww	
				0,811 ww	0,900 ww	
				0,777 ww	0,890 w	
				0,746 ww	0,857 ww	
				0,726 ww	0,848 ww	
				0,694 ww		
				0,652 ww		
				0,620 ww		

(Continuación)

MA (6)	MF (6)	C ₂ F (6)	C,AF (6)	[KΛ (1)	NA (3)	NC,A, (3)
2,84 s	2,95 m	2,69 ss	2,77 s	3,07 ww	2,94 s	3,37 w
2,43 ss	2,52 ss	2,07 w	2,63 ss	2,72 ss	2,68 s	3,03 w
2,02 ss	2,17 m	1,940 ss	2,54 ww	2,59 w	2,60 ss	2,68 ss
1,644 m	1,706 m	1,840 s	2,43 ww	2,48 w	2,55 ss	2,60 w
1,551 ss	1,606 s	1,740 w	2,19 m	2,395 w	2,38 w	2,53 w
1,423 ss	1,476 ss	1,655 w	2,15 m	2,315 m	2,22 ww	2,41 w
1,362 w	1,322 w	1,585 s	2,03 s	2,215 w	2,145 w	2,37 w
1,274 w	1,274 w	1,558 m	1,921 ss	2,000 w	1,983 ww	2,20 s
1,231 m	1,116 w	1,523 m	1,853 m	1,918 m	1,950 m	2,10 w
1,166 m	1,089 m	1,475 w	1,808 s	1,567 s	1,869 m	2,03 w
1,131 w	1,044 w	1,330 m	1,728 m	1,488 ww	1,805 w	1,915 s
1,079 m	0,965 w	1,170 m	1,572 s	1,348 m	1,762 m	1,888 s
1,050 s	0,876 w	1,140 w	1,532 s	1,214 s	1,599 s	1,840 ww
1,008 w	0,853 w	1,087 w	1,492 m	1,109 w	1,523 w	1,797 ww
0,949 w	0,806 w	1,010 w	1,448 m	1,025 m	1,497 s	1,746 w
0,930 m		0,973 w	1,415 m	0,906 w	1,471 w	1,692 wb
0,901 m		0,945 ww	1,385 m	0,860 m	1,458 s	1,628 w
0,844 m		0,894 ww	1,357 m	0,820 w	1,415 m	1,558 ss
0,822 s		0,871 ww	1,339 m	0,754 w	1,362 s	1,492 w
0,780 m			1,317 s		1,302 w	1,347 m
0,712 w			1,207 s		1,283 w	1,235 w
0,647 w			1,154 m		1,176 ww	1,210 m
0,636 w			1,130 m		1,119 m	1,103 w
0,615 w			1,098 m		1,065 ww	1,101 w
			1,074 m		1,048 m	1,055 w
			1,039 ww		1,028 ww	1,019 mb
			1,002 s		1,010 w	0,899 w
			0,981 ww		0,980 ww	
			0,966 w		0,975 ww	
					0,955 w	
					0,918 ww	
					0,910 ww	
					0,880 ww	
					0,805 ww	
					0,782 ww	
					0,762 ww	

REFERENCIAS

1. Brownmiller, L. T., *Am. J. Sci.*, **26**, 260 (1935); PCAF Paper 30.
2. Brownmiller, L. T., and Bogue, R. H., *Am. J. Sci.*, **20**, 241 (1930) PCAF Paper 24.
3. Brownmiller, L. T., and Bogue, R. H., *Am. J. Sci.*, **23**, 501 (1932) PCAF Paper 25.
4. Greene, K. T., *J. Res. NBS*, **32**, 1 (1944); RP 1570; PCAF Paper 45.
5. Hansen, W. C., *J. Am. Ceramic Soc.*, **11**, 68 (1928); PCAF Paper 12.
6. Hansen, W. C., and Brownmiller, L. T., *Am. J. Sci.*, **15**, 225 (1928); PCAF Paper 14.
7. Harrington, E. A., *Am. J. Sci.*, **13**, 467 (1927); PCAF Paper 8.
8. McMurdie, H. F., in paper by Taylor, W. C., *J. Res NBS*, **27**, 317 (1941); RP 1321; PCAF Paper 40.

Figura 3.9. Diagramas de difracción de rayos X de los componentes del clinker y de sus compuestos.

Fuente: La química del cemento Portland – Robert Herman Bogue (1952).

En la siguiente imagen se pueden ver fotografías de diagramas de difracción de rayos X.

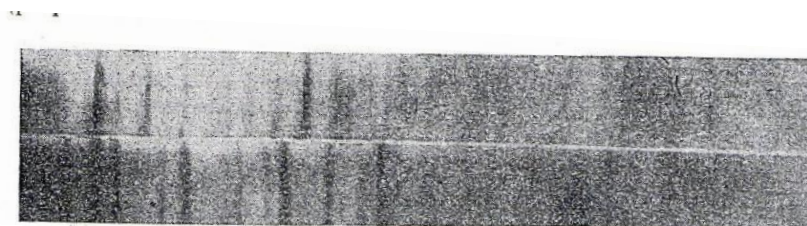


Figura 3.10. Superior: Diagrama de difracción de rayos X de una mezcla equimolecular de $SC_2 - \beta$ y CaO . Inferior: Diagrama de C_3S puro.

Fuente: La química del cemento Portland – Robert Herman Bogue (1952).

La precisión de las medidas de los espacios interplanares aumenta al disminuir dichos espacios. El promedio de desviaciones en una serie se ha visto que varía de 0,004 a 0,001. La intensidad de las líneas se mide en general visualmente, pero para una estimación más precisa de la intensidad de la línea se aplicó un fotodensímetro. Los espacios interplanares se miden directamente por medio de una escala especial. Con el espectrómetro de rayos X Phillips, que en vez de la película fotográfica emplea un contador Geiger, se pueden registrar directamente la intensidad y los espacios sobre una tira de cartulina de un potenciómetro registrador. Los ángulos de difracción Θ se miden a partir del radio conocido de las películas y de las distancias medidas de las líneas desde el “cero” o posición del rayo no desviado. Los valores de $\sin^2\Theta$ y las relaciones de $\sin^2\Theta$ se calculan a partir de estos datos. Los índices de Miller (h,k,l) correspondientes a cada línea y las distancias relativas (d_{hkl} / α_0) de los planos atómicos que hacen destacar la línea, se calculan a partir del sistema a que pertenece el cristal, sus ángulos axiales, relación de ejes y la de $\sin^2\Theta$ (Wyckoff). La constante de la red se determina inmediatamente partiendo de sus distancias relativas e interplanares.

En un estudio de los compuestos del cemento debido a Brownmiller y Bogue se encontró que eran necesarias las concentraciones siguientes de cada fase cristalina en los clinker de cemento para que se pudieran determinar por este

método de difracción de rayos X.

Fase Cristalina	%
C ₃ S	8
C ₂ S-β	15
C ₃ A	6
C ₄ AF	15
MgO	2,5
CaO	2,5

Tabla 3.2. Porcentajes de las fases cristalinas del clinker de cemento Portland.

Fuente: La química del Cemento Portland, Bogue (1952).

La longitud de onda de los rayos X (ver Figura 3.11.) está situada en el mismo orden de magnitud que las distancias que separan a las masas materiales en los retículos cristalinos, a saber, en la región de las unidades Å, o sea, en la de los 10^{-10} m o del 0,1 nm.

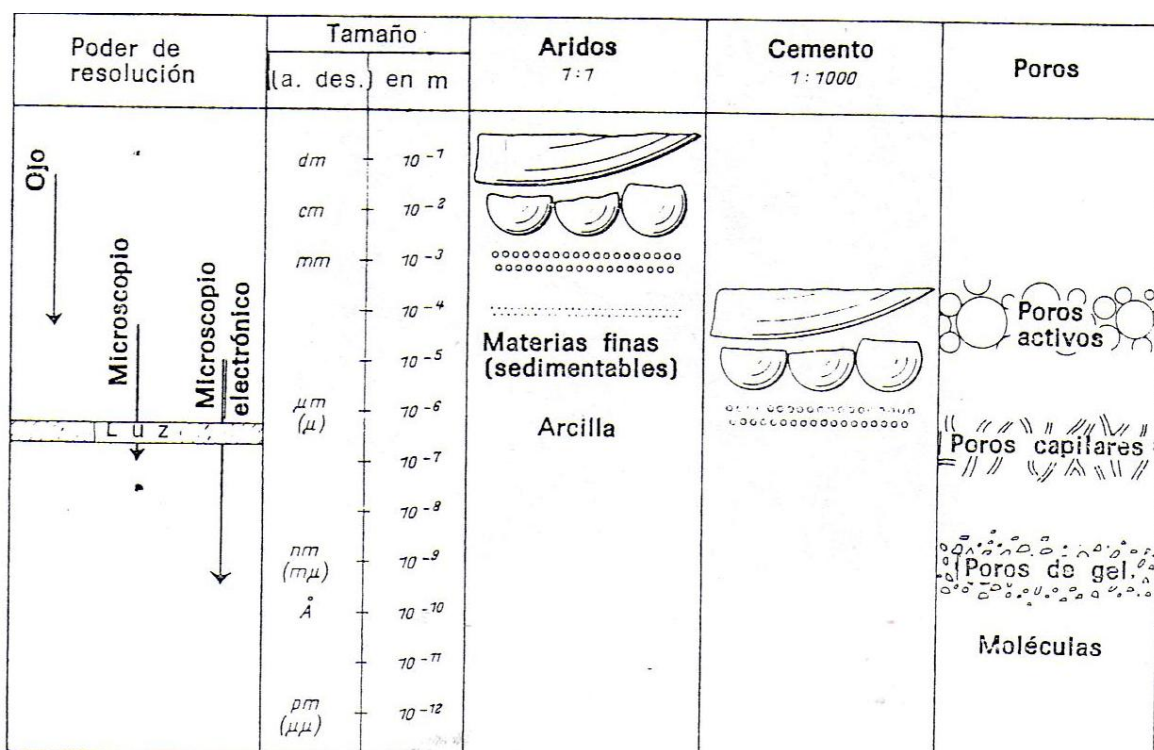


Figura 3.11. Poder de resolución y órdenes de magnitud de áridos cemento, poros de aire, poros capilares y de gel. Designación de unidades referidas al metro y expresadas de modo habitual en micrómetros (μm), nanómetros (nm), picómetros (pm) y Armstrongs (Å).

Fuente: Cemento, fabricación, propiedades y aplicaciones – Dr. Phil Fritz Keil (1973).



Si se envían rayos X como lo hizo por primera vez M. von Laue, en 1912, a través de una red cristalina, aquellos son desviados o dispersados por los elementos constituyentes del retículo con diferente intensidad. Ocurre lo mismo que cuando inciden sobre la superficie y son reflejados por ella. Lo mismo que en la luz visible, estas ondas pueden anularse o sumarse y lo hacen de un modo característico para cada estructura cristalina. Por incidencia de los rayos X sobre polvo fino de sustancias cristalinas, se obtienen anillos circulares, siguiendo el método de Debye-Scherrer por aplicación de una placa sensible dispuesta sobre un cilindro circular en cuyo centro está colocada la muestra analizada y cuya intensidad permite ser valorada fotométricamente o, como hoy se practica de modo habitual, es registrada mediante la utilización de un tubo contador que se desplaza sobre el perímetro del círculo y de un registrador de impulsos. Los picos que aparecen en las curvas de valoración son característicos para cada sustancia a través de la distancia que los separa de los rayos iniciales y de la altura de los picos dependientes de la concentración de la sustancia. La figura a continuación, muestra uno de esos diagramas con algunos de los picos característicos para las fases de la probeta de clinker.

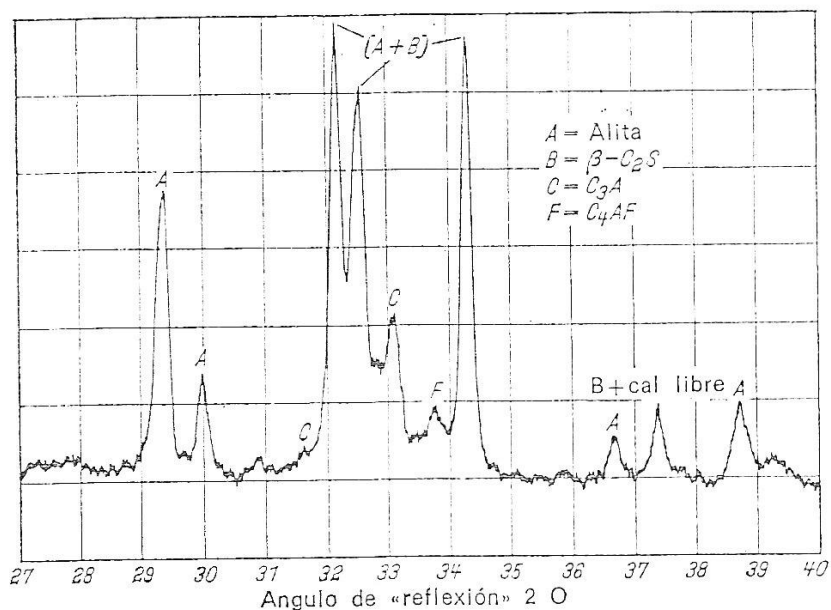


Figura 3.12. Diagrama a rayos X (sección) de un clinker de cemento Portland con las – reflexiones – (picos) de las fases más importantes.

Fuente: Cemento, fabricación, propiedades y aplicaciones – Dr. Phil Fritz Keil (1973).

De este modo pueden ser determinadas cuantitativamente las fases cristalinas del clinker. Las dispersiones de los valores que se obtienen relación al análisis potencial de Bogue, tienen su base en que la alita con estructura cristalina correspondiente al C_3S contiene, además, Al y Mg; lo mismo ocurre para la bellita; las desviaciones se mueven en promedio en el orden de magnitud de sólo un 2%. El análisis por difracción de rayos X (en inglés, X-Ray Diffraction Analysis, o, abreviadamente, XR) ha sido perfeccionado con dispositivos adicionales, por ejemplo, con el método Guinier, el cual aplica la cámara de alta temperatura aplicada por Trömel, y la cámara climatizada descrita por W. Dosch, en 1965.

Con la microsonda, desarrollada por Castaing y Guinier, se pueden analizar, cualitativa y cuantitativamente, muestras de tamaño inferior a $1\mu m$, como ha informado H. Malissa, en 1966. Sobre la muestra pulida, previamente estañada al vapor y convertida por tanto en eléctricamente conductora, se dirige un pincel fino de electrones. Los elementos irradiados son excitados y emiten rayos X con

un espectro característico, el cual es descompuesto en un determinado número de rayos cuya intensidad se mide. De este modo, por enfoque, se puede realizar un análisis puntual del entorno irradiado de sólo algunos μm^3 ; por rastreo de la muestra, según una recta, se obtiene un análisis lineal y, por rastreo según series regulares de líneas se logra la realización de un análisis superficial. Si se dispone del espectrómetro sobre la línea de un determinado elemento, se obtiene entonces sobre la pantalla luminosa, y de modo correspondiente, sobre papel fotográfico, la imagen de la distribución del elemento. Con fotografías electrónicas se pueden descubrir sobre la probeta defectos de homogeneidad.

O. Peterson (1967) pudo comprobar con este procedimiento, en 6 muestras diferentes de clinker, diferencias en el contenido de alúmina de la alita. En los microporos estaba presente el potasio en forma de sulfato, también en la belita y en la masa intersticial.

P. Terrier, H. Hornain y G. Sacroun han aplicado la microsonda para la investigación de las fases de clinker y han establecido, entre otras cosas, que las relaciones CaO/SiO_2 para la alita y la bellita superan algo a 3/1 y 2/1, respectivamente, y también han encontrado como componentes adicionales en el AC_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , y en el FAC_4 , MgO y SiO_2 . El TiO_2 se encuentra especialmente en el FAC_4 , los álcalis en AC_3 . P. Terrier y M. Moreau (1966), habían seguido el comportamiento del clinker y de las cenizas volantes para un tamaño de grano a partir de $7\mu\text{m}$ durante un período de endurecimiento de 18 meses. A partir del SC_3 del clinker se forma topoquímicamente¹⁷ un hidrato con doble refracción, y otro isótropo, y además portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ primaria y secundaria. Las cenizas volantes, por razón de su escasa superficie específica, reaccionaban poco. H.E. Schwiete y P. Kastanja (1969), los han aplicado a la investigación de los fundidos granulados. H. Lehmann y H. Salge conceden, en 1969, alto valor al microanálisis con rayos de electrones, abreviadamente EMA, en particular para la investigación de iones extraños en las fases del clinker.

¹⁷ TOPOQUÍMICAMENTE, "topos" del griego $\gamma\omicron\pi\omicron\varsigma$ = lugar, es decir la ubicación espacial de las distintas sustancias químicas dentro de la estructura mineral.



3.3. Activación de las arcillas y puzolanas

En la actualidad, por razones económicas y medioambientales, la industria cementera busca optimizar el uso de materiales de sustitución del clinker de cemento por otros materiales cementicios suplementarios.

La reacción puzolánica se caracteriza por el consumo de hidróxido de calcio por parte de la sílice o alúmina reactiva presente en las puzolanas, para formar los hidrosilicatos de calcio. El contenido del gel de estos productos de reacción es generalmente incrementado, propiciando una menor porosidad capilar y por ende superior resistencia y durabilidad (Taylor, 1990; Feldman, 1984; Agarwal, 2006).

El uso de las puzolanas es limitado. Factores como su disponibilidad no universal y la relativamente poca reactividad de algunas, como es el caso de la ceniza volante (Thomas 1999), unido a los aspectos técnico-económicos mencionados, atentan contra un uso más proliferado de las puzolanas en la actualidad; fenómeno más acentuado en países no desarrollados.

Actualmente, **uno de los materiales cementicios suplementarios más estudiados y usados los constituyen las arcillas calcinadas en forma de metacaolín**. Estos materiales, obtenidos a partir del tratamiento térmico de depósitos naturales de mineral caolín, **muestran excelentes propiedades puzolánicas debido fundamentalmente a su composición química, estructura amorfa y alta superficie específica**. Durante este tratamiento térmico, factores como la temperatura y tiempo de calcinación, así como la forma y tamaño de las partículas, influyen en la reactividad del metacaolín (Bich 2009; Goncalves 2009; Samet 2007).

La temperatura de calcinación de las arcillas influye en las propiedades puzolánicas del material resultante. **La mayor reactividad se alcanza cuando el proceso de calcinación provoca la deshidroxilación, dejando como resultado**



una estructura de arcilla colapsada y desordenada. La temperatura óptima de activación parece depender de la pureza del material y sus minerales acompañantes. Algunos autores han revisado ampliamente este parámetro en estudios anteriores, resumiendo que **la temperatura de activación óptima para el caso del caolín se encuentra en el rango de 630-800 °C (Fernández 2009; Sabir 2001).**

El metacaolín es reconocido por su aporte en las mejoras del hormigón cuando se usa como sustituyente parcial del cemento Portland. Estudios han demostrado que las resistencias en morteros y hormigones a edades tempranas se incrementan, debido al efecto de relleno y a una acelerada hidratación del cemento, lo cual resulta en un refinamiento de la estructura de poros (Agarwal, 2006; Lawrence 2005). Además se ha demostrado su aporte en reducir los efectos de la reacción álcali-sílice, ya que reacciona en presencia de agua con el hidróxido de calcio presente en la solución del poro para así formar fases cementicias de hidrosilicatos de calcio.

El inconveniente del uso del metacaolín se centra en la necesidad de disponer de arcillas puras en mineral caolín como materia prima para su producción, además de los altos costos de energía que exige su proceso de producción durante la calcinación. Formas viables de disminuir estas desventajas serían el empleo de arcillas de más bajo grado de pureza, unido a un eficiente proceso energético de producción durante su calcinación.

Experiencias anteriores a este trabajo contribuyen a hacer más viable el proceso de calcinación de estas arcillas. Tal es el caso del bloque sólido combustible, el cual garantizaba el proceso de calcinación a temperaturas que oscilaban los 900 °C (Martirena, 1999).

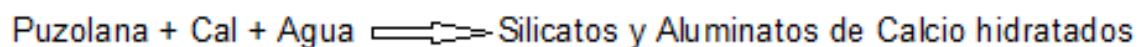
Teniendo en cuenta este antecedente se fabricó un horno experimental para acometer la quema de esta combinación densificada de biomasa y arcilla,

con vista a recolectar los residuos de dicho proceso y evaluar sus potencialidades como puzolana. Luego de un estudio detallado de la ceniza producida a partir de la quema del bloque sólido combustible, se detectó que la misma poseía deficiente actividad puzolánica. Las condiciones descontroladas de quema provocaron la presencia de altos contenidos de material sin quemar y de residuos de carbón en la ceniza recolectada, comprometiendo seriamente la reactividad de la misma. Esto condujo a la decisión de procesar y estudiar por separado el material arcilloso.

En un trabajo anterior se empleó con otros objetivos esta misma arcilla, es decir, de igual procedencia, proceso de sedimentación y tratamiento térmico (Fernández, 2009). Este demostró como a medida que se incrementaba la temperatura de calcinación de 600 ° C hasta alcanzar los 1000 ° C, aparecía una considerable disminución de la superficie específica (de aproximadamente 40 m²/g a menos de 5 m²/g), debido básicamente a la aglomeración de las partículas y por el fenómeno de sinterización de la fase líquida. Producto de ello, la reactividad de esta arcilla era significativamente afectada.

3.4. Actividad puzolánica

La actividad puzolánica se refiere a la cantidad máxima de hidróxido de calcio con la que la puzolana se puede combinar y la velocidad con la cual ocurre esta reacción.



La actividad puzolánica depende de la naturaleza y proporción de las fases activas presentes en la puzolana (composición mineralógica), de la relación cal – puzolana de la mezcla, de la finura (o superficie específica) de la puzolana y de la temperatura de la reacción. Los productos de reacción puzolana/cal generalmente son del mismo tipo que los productos de hidratación del Cemento Portland: Silicatos Cálcicos Hidratados, Aluminatos Cálcicos Hidratados y Sílico -



Aluminatos Cálcicos Hidratados.

La actividad puzolánica responde a un principio general. Dicho principio se basa en que la sílice y la alúmina como componentes ácidos de materiales puzolánicos, reaccionan con la cal a condición de que sus uniones en dichos materiales sean lábiles.

No pueden considerarse aparte las acciones de la sílice y de la alúmina, ya que la presencia de esta última favorece en gran medida la acción puzolánica, directamente por sí e indirectamente al implicar su presencia un mayor contenido de álcalis que se fijan parcialmente en los nuevos productos resultantes de la reacción puzolánica, los cuales tienen el carácter de pseudogeles. El óxido de hierro se supone que actúa como alúmina, pero de una forma más atenuada y lenta. Las estructuras zeolíticas se atacan por la cal más rápidamente que las verdaderas puzolanas totalmente vítreas y la fijan en mayor cantidad que la correspondiente a un intercambio catiónico con álcalis, lo cual indica una ruptura de la estructura reticular y de los enlaces químicos, lo que da lugar a una participación de la sílice y de la alúmina, que es más fácil con las estructuras zeolíticas que en las vítreas.

En efecto, por lo que se refiere a las puzolanas de origen mineral, su actividad se ha atribuido tanto a los constituyentes amorfos como a los cristalinos, y en particular a los de naturaleza zeolítica. La gran reactividad de las puzolanas tanto naturales como artificiales, depende además de su composición química y mineralógica, y de la cantidad de fase amorfa o vítrea, de su gran superficie reactiva, de la presencia de álcalis, alcalinotérreos y del grado de condensación de grupos como SiO_4 , AlO_4 , etc.

Algo análogo sucede con las puzolanas de origen orgánico, dado que otros materiales de similar origen y composición son inactivos frente a la cal, la actividad de estas puzolanas de origen orgánico no es sólo cuestión de contenido en sílice

hidratada, sino también del estado físico de división de la misma.

Lo prueba, por una parte, el hecho de que las activas poseen una estructura natural porosa con una gran superficie específica interna, y por otra, la circunstancia de que ciertos ópalos¹⁸ y basaltos¹⁹ no activos cobran actividad cuando se molturan a gran finura y se someten a una gran lixiviación con ácido clorhídrico concentrado (10 normal).

La sílice hidratada reactiva, componente eficaz de las puzolanas de origen orgánico, procede en su mayor parte de esqueletos de infusorios radiolarios y de algas marinas diatomeas, aparte de los citados ópalos y geiseritas. Pero no todas las puzolanas de esta procedencia, altas en sílice, tienen la misma actividad. En algunas de ellas se incrementa también sometiéndolas a calcinación, como sucede con el “moler” danés, con la “gaize” francesa del Valle de Mosa y con las “tierras blancas” italianas del norte del Lacio, muy ligeras y porosas, cuyo análisis microscopio revela cuarzo, mica y feldespato más o menos alterados, en una matriz amorfa de gel de sílice.

Para determinar la Actividad Puzolánica de un material, existen diferentes métodos tanto de carácter químico como mecánico, según se referencia en las normas Ecuatorianas INEN²⁰, y en el resto de normas, tales como ASTM²¹ y UNE²².

- Método del cemento, NTE INEN 0496:81 (UNE 80280/88; EN 196-5).

¹⁸ ÓPALO, El **ópalo** es un mineraloide del grupo IV (óxidos), según la clasificación de Strunz relacionado con los cuarzos, aunque no es un cuarzo, y que se caracteriza por su brillo y astillabilidad. Hasta 2012 fue considerada una especie mineral válida por razones históricas; no obstante, no es un verdadero mineral, ya que está formado por cristobalita y/o tridimita más sílice amorfa (<http://www.gemselect.com/spanish/gem-info/opal/opal-info.php>, 28-07-2012, 13:17).

¹⁹ BASALTO, El basalto es una roca ígnea volcánica de color oscuro, de composición máfica—rica en silicatos de magnesio y hierro y bajo contenido en sílice—, que constituye una de las rocas más abundantes en la corteza terrestre.

²⁰ INEN, Instituto Ecuatoriano de Normalización.

²¹ ASTM, American Society for Testing and Materials.

²² UNE, Una Norma Española.



- La evaluación del Índice de Actividad Puzolánica con Cemento, ASTM C-311.

- **La norma ASTM C618 establece un índice mínimo, ($R_{\text{muestra}} / R_{\text{Patrón}}$) del 75% para clasificar un material como de carácter puzolánico.**

- La evaluación del Índice de Actividad Resistentes con Cementos Portland, UNE 83-451-86.

- El Índice de Actividad Puzolánica con Cal, ASTM C-311.

- Otros métodos mecánicos para evaluar la puzolanidad son los de Feret y Pauli (módulo de la efectividad de la puzolana).

En general, en una puzolana es requisito indispensable evaluar sus características físicas y químicas y su efecto en las propiedades finales del cemento o del hormigón según el caso.

Se debe tener conocimientos de los siguientes aspectos:

- Composición química (óxidos de sílice, hierro, aluminio, calcio, magnesio, álcalis y otros componentes menores).

- Propiedades físicas (finura - gravedad específica).

- Micro estructura.

- Espectroscopia IR y DRX (compuestos y cristalinidad).

- Actividad puzolánica.

- Requerimiento de agua.

- Efecto de contracción por secado.

- Efecto en las propiedades finales del cemento (resistencias mecánicas).



- Ensayos de durabilidad en concordancia con el medio de servicio (efectos en la reactividad álcali- agregado, efectos en el ataque por sulfatos, carbonatación, cloruros y otros ensayos requeridos en concordancia con el futuro de ambiente de servicio).

- Proporción óptima de uso.

- Especificación del producto y recomendaciones finales.

En general, las ventajas de todo orden que pueden obtenerse de los cementos puzolánicos son las señaladas en la Tabla 3.3. Dichas ventajas hacen aptos a los cementos puzolánicos para una amplia serie de empleos específicos relacionados por lo general con la obra civil.

A. En la resistencia mecánica A.1 A largo plazo, al prolongar el período de endurecimiento A.1.1 A tracción A.1.2 A compresión A.1.3 Mejor relación tracción - compresión	E. En la plasticidad D.1 Rebajando la relación a/c D.2 Reduciendo la segregación D.3 Evitando la exudación y el sangrado
B. En la estabilidad B.1 Frente a la expansión por cal libre B.2 Frente a la expansión por sulfatos B.3 Frente a la expansión por la reacción álcalis - agregado B.4 Frente a la retracción hidráulica de secado, por la menor relación a/c B.5 Frente a la retracción térmica por enfriamiento B.6 Frente a la fisuración	F. En la impermeabilidad F.1 Reduciendo la porosidad F.2 Evitando la formación de eflorescencias F.3 Produciendo la mayor cantidad de Tobermorita
C. En la durabilidad C.1 Frente a ataques por agua puras y ácidas C.2 Frente a ataques por aguas y suelos sulfatados C.3 Frente a ataques por agua de mar C.4 Frente a ataques por gases de descomposición y fermentación de materias orgánicas C.5 Frente a la desintegración por la reacción álcalis - agregado	G. En la adherencia G.1 Del agregado a la pasta G.2 Del mortero a las armaduras
D. En el rendimiento y la economía D.1 Al corresponder a los cementos puzolánicos mayor volumen que a otros conglomerantes a igualdad de peso D.2 Al ser los cementos puzolánicos, en general, conglomerantes más baratos	H. En el comportamiento térmico H.1 Al liberar menor calor de hidratación H.2 Al producir menor elevación de temperatura

Tabla 3.3. Ventajas del uso de puzolana en el cemento puzolánico.

Fuente: <http://www.ecoingenieria.org/docs/Puzolanas.pdf>, (2012).

3.5. Análisis Físicos

Los análisis físicos realizados en esta determinación, están descritos en el Manual de Procedimientos empleados por el Departamento de Calidad de la Compañía Industrias Guapán S.A., los cuales a su vez, están

basados en las normas ecuatorianas INEN para la fabricación de cemento Portland Puzolánico Tipo IP.

3.5.1. Determinación de la Humedad

La determinación de la humedad higroscópica se aplica a las arcillas según el siguiente procedimiento (basado en la NTE INEN 862:2011):

PROPÓSITO.- Esta instrucción tiene como propósito la determinación de la humedad higroscópica en las diferentes muestras que se requiere para la fabricación de cemento.

ALCANCE.- Se aplicarán a muestras de caliza, materiales arcillosos, crudo, puzolana, yeso, cemento.

DEFINICIONES:

Humedad Higroscópica.- Se denomina humedad higroscópica a la cantidad de agua absorbida en una muestra expresada en porcentaje de su peso, hasta los 105 °C.

Copelas Taradas.- Recipiente utilizado para contener la muestra en la que se realiza el ensayo de la determinación de la humedad y que se encuentra determinado su peso.

EQUIPO NECESARIO:

- Copelas Taradas.
- Estufa.
- Cronómetro.
- Plancha térmica.
- Balanza.

INSTRUCCIONES:

Se pesa una cantidad determinada de muestra en una copela previamente tarada; para la fórmula de cálculo se utiliza la nomenclatura “po”. Se deseca la muestra en la plancha térmica que trabaja entre 150°C a 300°C durante 15 minutos, hasta peso constante. Se enfría la muestra y finalmente se pesa la muestra contenida en la copela con la denominación “pf”.

Para determinar la humedad del yeso se varía la temperatura y el tiempo a 45°C por dos horas.



Figura 3.13. Copelas con muestras de arcilla y puzolana sobre plancha térmica. Determinación de la humedad.

Fuente: Delgado – Negrete (2012).

CÁLCULOS.- Se calcula el porcentaje de agua (humedad) por diferencia de peso utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{po - pf}{po} \times 100$$

Donde:

- po: peso inicial.
- pf: peso final.

Ejemplo: Para el caso de la muestra número 1 P3 Puzolana de Latacunga, se tiene los valores:

- po: 34,44g
- pf: 30,50g

Aplicando la ecuación se tiene:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{34,44 - 30,50}{34,44} \times 100$$

$$\% \text{ Humedad} = 11,44\%$$

Los resultados de los análisis de esta prueba se muestran a continuación en la tabla 3.4.

N°	Id	Nombre de la muestra	Fecha	po (g)	pf (g)	Humedad %
1	P3	Puzolana Latacunga	06/02/2012	34,44	30,50	11,44
2	P4	Puzolana Challuabamba	07/02/2012	89,16	84,67	5,04
3	P5	Puzolana Déleg	24/02/2012	50,00	44,48	11,04
4	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	09/02/2012	50,00	49,42	1,16
5	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	09/02/2012	50,00	49,95	0,10
6	P8	Arcilla Guapán	06/02/2012	91,61	79,01	13,75
7	P9	Caolín Tierra Blanca	22/02/2012	50,00	36,69	26,62
8	P10	Arcilla Taday	09/02/2012	104,00	81,37	21,76
9	P11	Polvos Torre de Rocío	01/03/2012	50,00	48,09	3,82

Tabla 3.4. Resultados de porcentaje de humedad de muestras de arcilla y puzolana.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

3.5.2. Determinación del porcentaje de retenido en el tamiz ASTM 325

Referenciado en la NTE INEN 957:2012. Siendo la cantidad máxima admisible de árido retenido del 20%, según NTE INEN 490:2011.

PROPÓSITO.- Establecer una instrucción para la determinación correcta del

ensayo del retenido en el tamiz ASTM 325; finura por tamizado húmedo (tamiz de $45\ \mu\text{m}$ o $0,045\text{mm}$).

ALCANCE.- Se aplica al producto cemento (cemento de fabricación, cemento de expedición), arcillas y puzolanas.

DEFINICIONES:

Este ensayo se basa en medir la cantidad de muestra que queda retenida en el tamiz número 325 ASTM, al realizar el tamizado húmedo. El tamiz 325 es el tamiz con una abertura de $45\mu\text{m}$. Para este tamizado se utiliza una boquilla de atomización que permita esparcir un chorro de agua cuya presión sea regulable y que de una presión máxima de $0,2\text{MPa}$, la misma que es registrada en un manómetro.

Fineza.- Se denomina fineza al grado granulométrico de un material determinado.

Tamiz.- Clasificador de materiales por medio de una malla de abertura determinada y especificada.

EQUIPO:

- Manómetro
- Tamiz
- Boquilla de atomización
- Balanza electrónica
- Plancha de calentamiento.

INSTRUCCIONES:

Se pesa 1g de muestra, a continuación se coloca la muestra en el tamiz limpio y seco, y se humedece completamente con un chorro suave de agua. Se retira el tamiz de debajo de la boquilla atomizadora y se ajusta la presión del agua a $0,07 \pm 0,0035\text{MPa}$, luego se coloca nuevamente el tamiz debajo de la boquilla y se

lava la muestra durante 1 minuto, moviendo circularmente el tamiz en un plano horizontal a la velocidad de una revolución por segundo en el chorro atomizado, cuidando que el fondo de la boquilla atomizadora penetre 12,5 mm en el marco del tamiz.

Se retira del chorro el tamiz y se enjuaga con 50 cm³ de agua destilada y luego se seca suavemente la superficie inferior del tejido del tamiz y sus paredes exteriores con una tela limpia y húmeda.

Finalmente se seca el tamiz y el retenido en un horno de secado o sobre una plancha de calentamiento, teniendo en cuenta de no calentar demasiado el tamiz para no debilitar la soldadura, colocando el tamiz de tal manera que el aire pueda circular libremente por debajo de él. Finalmente se debe enfriar el tamiz, y mediante una brocha sacar todo el retenido y pesarlo en la balanza analítica (m_p).



Figura 3.14. Resultados de porcentaje de humedad de muestras de arcilla y puzolana.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

CÁLCULOS.- Los cálculos del porcentaje de retenido en el tamiz 325 se pueden hacer utilizando la siguiente ecuación:

$$\%R = m_p \times 100$$

Dónde:

- %R = porcentaje de retenido en el tamiz 325.
- m_p = cantidad de muestra que no atraviesa el tamiz 325.

Ejemplo: Para la muestra número 1 P3 de Puzolana de Latacunga se tiene los siguientes valores obtenidos experimentalmente:

- m_p : 0,0863g

Aplicando la respectiva ecuación se tiene:

$$\%R = 0,0863 \times 100$$

$$\%R = 8,63\%$$

Los resultados se muestran a continuación en la tabla 3.5.

N°	Id	Nombre de la muestra	Fecha	m_p (g)	Retenido %
1	P3	Puzolana Latacunga	06/02/2012	0,0863	8,63
2	P4	Puzolana Challuabamba	07/02/2012	0,1871	18,71
3	P5	Puzolana Déleg	24/02/2012	0,1360	13,60
4	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	09/02/2012	0,1085	10,85
5	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	09/02/2012	0,1204	12,04
6	P8	Arcilla Guapán	06/02/2012	0,0543	5,43
7	P9	Caolín Tierra Blanca	22/02/2012	0,2342	23,42
8	P10	Arcilla Taday	09/02/2012	0,1355	13,55
9	P11	Polvos Torre de Rocío	01/03/2012	0,1316	13,16

Tabla 3.5. Resultados de porcentaje de retenido de muestras de arcilla y puzolana.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

3.5.3. Determinación de la densidad real de las arcillas y puzolanas

Procedimiento descrito en el documento I.CK – 7.1 – 20 presente en el Manual de Calidad de la Compañía Industrias Guapán S.A. con referencia a la Norma NTE INEN 156 Cemento Hidráulico: Determinación de la densidad.

PROPÓSITO.- Establecer la instrucción documentada para la determinación de la densidad real.

ALCANCE.- Este procedimiento se aplica para la determinación de la densidad real en el cemento, arcillas y puzolanas.

DEFINICIONES:

Densidad Real.- La determinación de la densidad consiste en establecer la relación entre la masa de sustancia (cemento, arcilla, puzolana) y el volumen de líquido no reactivo que esta masa desplaza en el frasco de Le Chatelier.

Frasco de Le Chatelier.- El frasco de Le Chatelier es un frasco con graduaciones propias para determinar la densidad.

EQUIPO:

- Frasco de Le Chatelier.
- Embudo de vidrio.
- Soporte universal.
- Vasos de precipitación.
- Termómetro
- Líquido no reactivo (diesel).

INSTRUCCIONES:

Cuidando de que el frasco de Le Chatelier esté completamente seco, se lo llena con el líquido de desplazamiento hasta enrasar en una división comprendida entre



las marcas de 0 a 1cm^3 , evitando mojar la pared interior del frasco. El líquido de desplazamiento puede ser kérex u otro derivado del petróleo, con una densidad no menor a $0,7268\text{ g/cm}^3$ a una temperatura de 20°C .

Se sumerge el frasco en un baño de agua a $20\pm 0,1^\circ\text{C}$, manteniéndolo vertical hasta que su contenido haya alcanzado la temperatura del baño, momento en el cual se debe efectuar la lectura (V1) que corresponde al volumen ocupado por el líquido contenido en el frasco.

Se introduce en el frasco la cantidad de muestra cuya densidad queremos conocer (64g para el cemento, más o menos 50g para arcillas y puzolanas), evitando que se produzcan salpicaduras o que el material se adhiera a la pared interior del frasco sobre el nivel del líquido.

Se tapa el frasco y tomándolo adecuadamente, girarlo en posición inclinada o en círculos horizontales hasta que, colocado en una superficie horizontal, no asciendan burbujas de aire a la superficie del líquido, liberando de esta manera el aire de la muestra.

Finalmente, se sumerge el frasco en el baño de agua para mantener la temperatura de $20\pm 0,1^\circ\text{C}$ y se registra la lectura final del volumen (V2).



Figura 3.15. Equipo para la determinación de la densidad real de muestras de arcilla y puzolana.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Para este estudio la sustancia a ser desplazada por el material sólido que se utilizó fue **diesel comercial con una densidad de $0,84\text{g/cm}^3$** , la misma que fue determinada por el método del densímetro según se puede observar en la Figura 3.16.



Figura 3.16. Determinación de densidad aparente de diesel comercial.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

La temperatura del baño de agua para desarrollar la prueba fue de 20°C sin variación.

CÁLCULOS.- La densidad real se calcula mediante la ecuación:

$$d = \frac{m}{V2 - V1}$$

Dónde:

- d : densidad de la muestra en g/cm³.
- m : masa de la muestra utilizada.
- $V1$: volumen del líquido en la primera lectura.
- $V2$: volumen del líquido + muestra en la lectura final.

Ejemplo: Para la muestra número 1 P3 de Puzolana de Latacunga los datos obtenidos fueron:

- m : 50,0003g.

- V1: 0,5cm³.
- V2: 20,7cm³.

Aplicando la ecuación anterior se obtiene:

$$d = \frac{50,0003}{20,7 - 0,5}$$

$$d = 2,475g/cm^3$$

Los resultados se muestran a continuación en la tabla 3.6.

N°	Id	Nombre de la muestra	Fecha	m (g)	V1 (cm ³)	V2 (cm ³)	Densidad g/cm ³
1	P3	Puzolana Latacunga	06/02/2012	50,0003	0,5	20,7	2,475
2	P4	Puzolana Challuabamba	07/02/2012	50,0007	0,5	20	2,564
3	P5	Puzolana Deleg	24/02/2012	50,0008	0,5	20,1	2,551
4	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	09/02/2012	50,0001	1	20,5	2,564
5	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	09/02/2012	50,0008	0,3	20,1	2,525
6	P8	Arcilla Guapán	06/02/2012	50,0007	0,2	20,1	2,513
7	P9	Caolín Tierra Blanca	22/02/2012	50,0003	0,8	21,9	2,370
8	P10	Arcilla Taday	09/02/2012	50,0007	0,6	21	2,451
9	P11	Polvos Torre de Rocio	01/03/2012	50,0003	0	19,4	2,577
10	P12	Cemento Patrón	01/03/2012	64,0006	0,2	20,4	3,168

Tabla 3.6. Resultados del ensayo de la densidad real de muestras de arcillas y puzolanas.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

3.5.4. Determinación del índice de Actividad Puzolánica por Difractometría de Rayos X.

Preparación de las muestras

Para este análisis se utiliza la muestra triturada y molida en el vibromolino, secada y fría. Las muestras van a ser activadas a tres rangos distintos de temperaturas con el motivo de identificar la temperatura óptima de activación para cada una de las muestras; así se activará a temperatura ambiente (20°C), a los 400°C, a 500°C y a los 600°C durante 30 minutos con cada una de las muestras y

luego se procederá a su análisis instrumental como se describe a continuación:

Se pesan aproximadamente 27g de muestra los cuales se introducen en crisoles de aleación oro – platino (ver Figura 3.17).



Figura 3.17. Crisoles de Pt/Au utilizados en el ensayo de calcinación de muestras de arcillas y puzolanas.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Las muestras son llevadas a activación, posteriormente a diferentes rangos de temperaturas (20°C, 400°C, 500°C y 600°C) por un lapso de tiempo de 30 minutos para cada una de las muestras en una mufla eléctrica (ver Figura 3.18).



Figura 3.18. Mufla de calcinación (hasta 1000°C) marca Lindocag para muestras de arcillas y puzolanas.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Una vez transcurrido el tiempo de activación se retira la muestra de la mufla y en caliente se muele a fino en un mortero de porcelana química (ver Figura 3.19).



Figura 3.19. Mortero de porcelana química utilizado para descompactar muestras calcinadas de arcillas y puzolanas.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

A continuación se deja enfriar la muestra y se procede a formar la pastilla probeta que será introducida en la cámara de lectura del difractómetro, para ello se toma la célula polimérica y en su centro se coloca la cantidad suficiente de muestra como para cubrir totalmente la superficie superior de la célula (ver Figura 3.20), para finalmente enrasar y pulir la superficie de la muestra con una pedazo de vidrio asegurándose de apisonar lo suficiente la muestra para compactarla.



Figura 3.20. Receptáculos para análisis de muestras por Difractometría de rayos X para equipo Bruker D2 (izq), preparación de muestra para análisis por Difractometría de rayos X (der).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

El último paso para concluir el análisis es colocar la probeta en el porta-muestras del equipo, cerrar la compuerta y correr el software de análisis Bruker Phaser D2 para puzolanas (ver Figura 3.21).

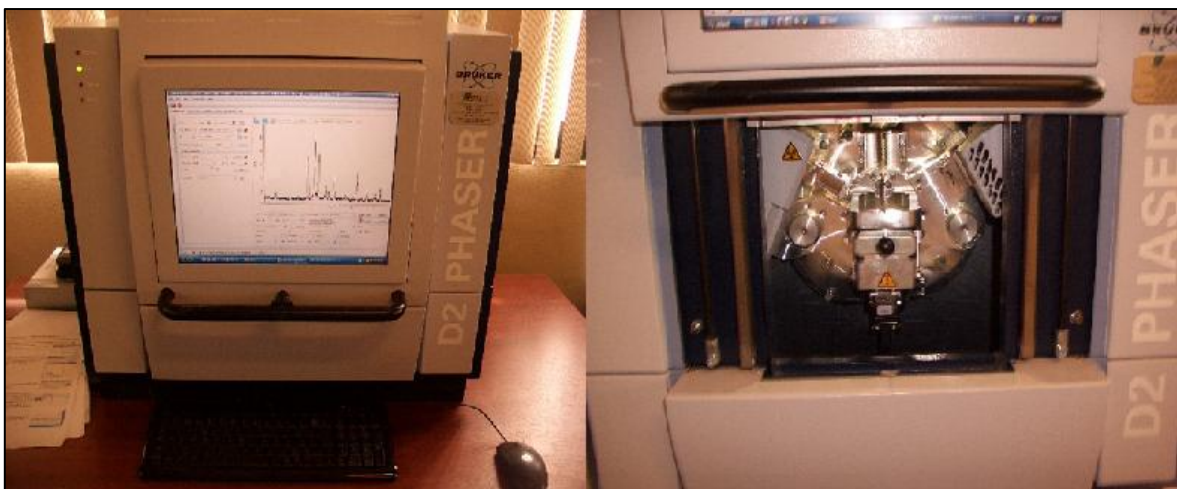


Figura 3.21. Difractómetro de Rayos X D2 Phaser, marca Bruker. En funcionamiento (izq), terminal interior de carga para muestras (der)

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

El análisis es automático y tiene una duración de 6 minutos, luego de los cuales se obtiene el Difractograma (ver Figura 3.22) y los valores en porcentaje de la composición cristalina de cada compuesto analizado así como también su porcentaje de fase amorfa.

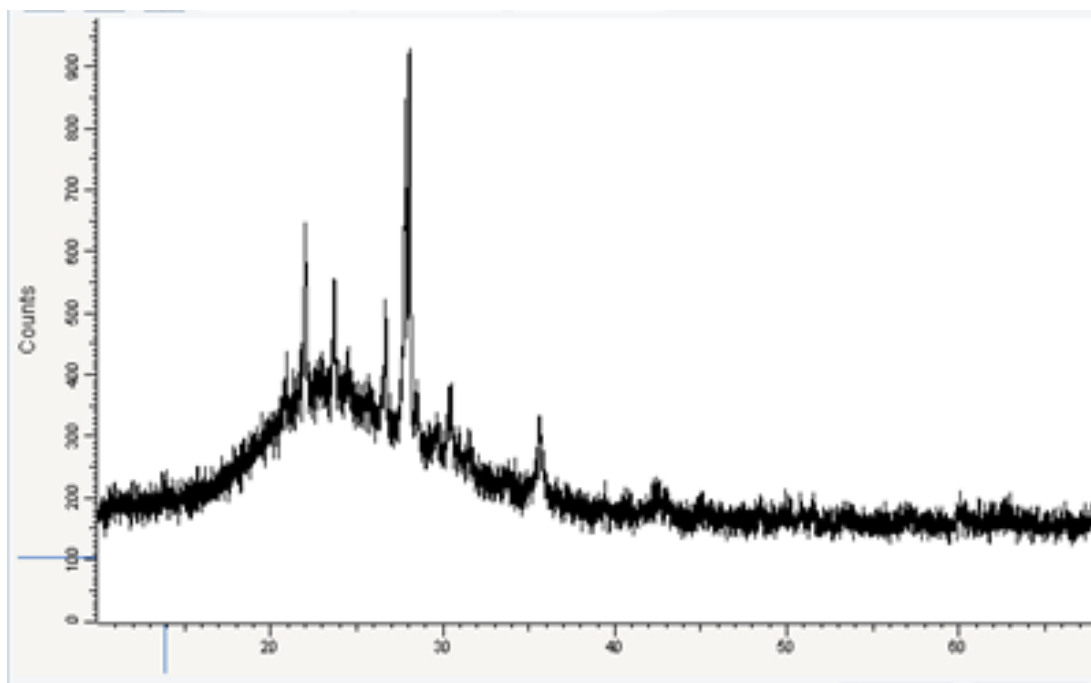


Figura 3.22. Difractograma de la muestra de puzolana de Latacunga sin activación por temperatura.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

La actividad puzolánica de cada muestra se obtiene en base al análisis por regresión lineal de datos de porcentaje de actividad puzolánica (método del cemento) frente a porcentaje de fase amorfa (análisis instrumental), obtenidos de seis diferentes tipos de puzolanas patrón utilizadas en el Laboratorio de Calidad de la Compañía Industrias Guapán. El método se describe a continuación:

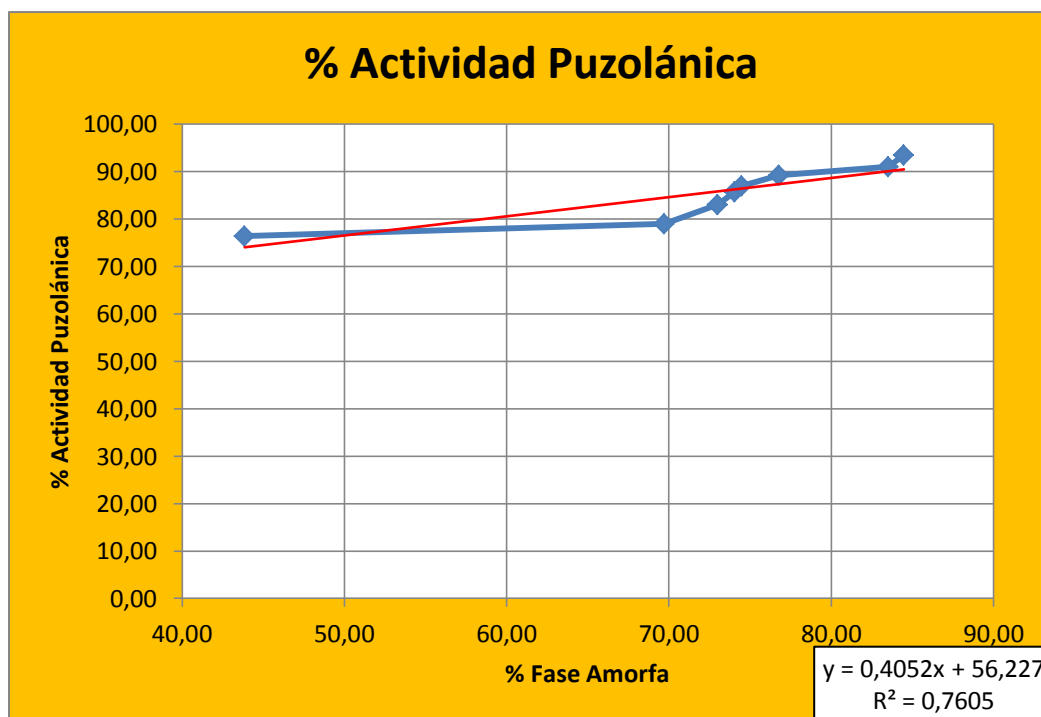
Los valores obtenidos de los análisis para cada una de las muestras patrón y ordenados en función del % de fase amorfa, se describen a continuación en la siguiente tabla:

Muestra	% Actividad Puzolánica	% Fase Amorfa
Patrón 6	76,40	43,85
Patrón 1	79,00	69,71
Patrón 4	83,00	73,00
Patrón 8	85,70	74,05
Patrón 7	87,00	74,50
Patrón 3	89,20	76,80
Patrón 5	91,00	83,51
Patrón 2	93,50	84,47

Tabla 3.7. Resultados del análisis de difracción y actividad puzolánica para las muestras de puzolana patrón.

Fuente: Departamento de Calidad de la Compañía Industrias Guapán S.A, (2012).

Utilizando el utilitario informático Excel del paquete de Microsoft Office 2003, se realiza la regresión lineal de estos datos y se obtienen los siguientes resultados:



Cuadro 3.1. Regresión lineal para el cálculo del porcentaje de actividad puzolánica patrón.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

La ecuación obtenida, con su correspondiente coeficiente de correlación lineal es del tipo $y=mx + b$ y sus valores son:

$$y = 0,4052x + 56,227$$

Dónde:

- y: porcentaje de actividad puzolánica
- x: porcentaje de fase amorfa del mineral.
- m=0,4052: pendiente de la ecuación.
- b=56,227: punto de intersección de las variables.
- R^2 : 0,7605.

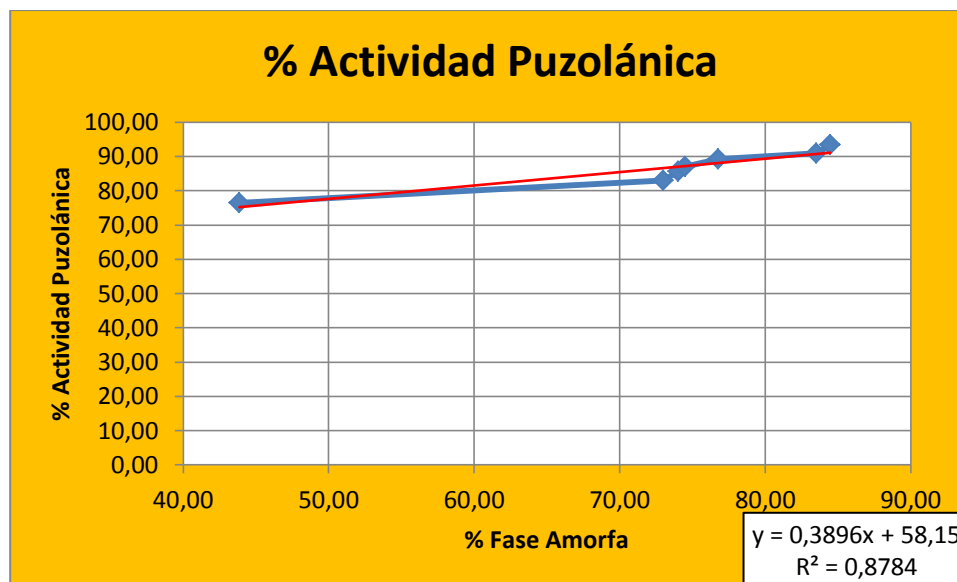
Como se observa, el coeficiente de correlación para la dispersión de estos valores es bajo debido a que existe el valor del patrón 1 que se encuentra desviado de la tendencia pudiendo también ser eliminado de los cálculos. En la tabla 3.8 se muestran los valores óptimos con los que se realizan los cálculos para obtener la ecuación que será aplicada finalmente:

Muestra	% Actividad Puzolánica	% Fase Amorfa
Patrón 6	76,40	43,85
Patrón 4	83,00	73,00
Patrón 8	85,70	74,05
Patrón 7	87,00	74,50
Patrón 3	89,20	76,80
Patrón 5	91,00	83,51
Patrón 2	93,50	84,47

Tabla 3.8. Resultados del análisis de difracción y actividad puzolánica para las muestras de puzolana patrón.

Fuente: Departamento de Calidad de la Compañía Industrias Guapán S.A, (2012).

Con estos datos la nueva tendencia es la siguiente:



Cuadro 3.2. Regresión lineal para el cálculo del porcentaje de actividad puzolánica patrón.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Para el Departamento de Calidad de la empresa es válido un coeficiente de correlación de $R^2 > 0,8$; por lo que esta ecuación es válida y se aplica a los cálculos de este estudio. Finalmente la ecuación a utilizar para el cálculo del porcentaje de actividad puzolánica en base a la fase amorfa del mineral es:

$$y = 0,3896x + 58,15$$

Dónde:

- y: porcentaje de actividad puzolánica
- x: porcentaje de fase amorfa del mineral.
- m=0,3896: pendiente de la ecuación.
- b=58,15: punto de intersección de las variables.
- R^2 : 0,8784.

Ejemplo:

Para la muestra de puzolana de Latacunga P3 – 1 (sin activación), el valor del porcentaje de la fase amorfa es de 76,63; es decir, para la ecuación anterior los

datos son:

$$y = 0,3896(83,67) + 58,15$$

$$y = 90.75 \% \text{ de actividad puzolánica.}$$

A continuación se muestran los valores obtenidos para cada una de las muestras luego del análisis instrumental por difracción de Rayos X, así como su valor de actividad puzolánica.

ANÁLISIS DE DIFRACTOMETRÍA POR RAYOS X										
N°	ID	Muestra	Temperatura de Activación				Fecha	% Fase Cristalina	% Fase Amorfa	% Actividad Puzolánica por Difracción
			20°C	400°C	500°C	600°C				
1	P3	Puzolana Latacunga		x			07/02/2012	22.34	77.66	88.41
2	P3	Puzolana Latacunga			x		08/02/2012	23.11	76.89	88.11
3	P3	Puzolana Latacunga				x	09/02/2012	25.99	74.01	86.98
4	P3	Puzolana Latacunga	x				05/03/2012	16.33	83.67	90.75
5	P4	Puzolana Challuabamba	x				07/02/2012	64.07	35.93	72.15
6	P4	Puzolana Challuabamba		x			08/02/2012	67.02	32.98	71.00
7	P4	Puzolana Challuabamba			x		08/02/2012	66.99	33.01	71.01
8	P4	Puzolana Challuabamba				x	09/02/2012	66.13	33.87	71.35
9	P5	Puzolana Deleg	x				24/02/2012	61.78	38.22	73.04
10	P5	Puzolana Deleg		x			27/02/2012	59.47	40.53	73.94
11	P5	Puzolana Deleg			x		27/02/2012	57.94	42.06	74.54
12	P5	Puzolana Deleg				x	27/02/2012	60.53	39.47	73.53
13	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	x				14/02/2012	57.64	42.36	74.65
14	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte		x			15/02/2012	57.17	42.83	74.84
15	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte			x		15/02/2012	57.89	42.11	74.56
16	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte				x	15/02/2012	56.77	43.23	74.99
17	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	x				14/02/2012	55.88	44.12	75.34
18	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte		x			15/02/2012	55.46	44.54	75.50
19	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte			x		15/02/2012	55.79	44.21	75.37
20	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte				x	15/02/2012	55.98	44.02	75.30
21	P8	Arcilla Guapán	x				06/02/2012	64.24	35.76	72.08
22	P8	Arcilla Guapán		x			07/02/2012	62.70	37.30	72.68
23	P8	Arcilla Guapán			x		08/02/2012	60.60	39.40	73.50
24	P8	Arcilla Guapán				x	09/02/2012	58.15	41.85	74.46
25	P9	Caolín Tierra Blanca	x				23/02/2012	59.14	40.86	74.07
26	P9	Caolín Tierra Blanca		x			23/02/2012	57.35	42.65	74.77
27	P9	Caolín Tierra Blanca			x		23/02/2012	57.84	42.16	74.58
28	P9	Caolín Tierra Blanca				x	23/02/2012	54.74	45.26	75.78
29	P10	Arcilla Taday				x	09/02/2012	37.35	62.65	82.56
30	P10	Arcilla Taday	x				09/02/2012	37.65	62.35	82.44
31	P10	Arcilla Taday			x		09/02/2012	37.17	62.84	82.63
32	P10	Arcilla Taday		x			13/02/2012	38.17	61.83	82.24
33	P11	Polvos Torre de Rocío				x	01/03/2012	63.59	36.41	72.34

Tabla 3.9. Porcentajes de Actividad Puzolánica. Método de análisis instrumental por Difracción de Rayos X.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

ANÁLISIS DE DIFRACTOMETRÍA POR RAYOS X										
N°	ID	Muestra	Cuarzo	Muscovita	Anortita	Albita	Calcita	Dolomita	Gipsita	Actinolita
1	P3	Puzolana Latacunga	5.6067	2.9257	0.1068	66.5942	1.6305	1.5745	4.1038	17.4585
2	P4	Puzolana Challuabamba	6.2533	0.6398	0.1500	78.9767	0.0538	0.0000	0.6685	13.2577
3	P5	Puzolana Deleg	1.1620	0.5010	0.0915	83.7448	0.0000	0.5630	1.6938	12.2433
4	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	75.9290	0.5430	0.0270	13.7468	0.0270	1.6350	0.3955	7.6970
5	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	75.6975	0.6915	0.0253	13.3020	0.0000	1.4145	0.5645	8.3043
6	P8	Arcilla Guapán	41.0968	3.6374	0.0546	49.9614	0.7580	0.0022	2.4178	2.0722
7	P9	Caolín Tierra Blanca	6.6540	2.3800	0.0425	73.4955	0.2655	5.5000	5.6030	6.0588
8	P10	Arcilla Taday	44.4305	7.5908	1.0578	16.0300	2.5260	0.0000	14.1123	14.2518
9	P11	Polvos Torre de Rocío	9.8470	0.0000	0.0000	0.0000	89.4790	0.0000	0.6320	0.0410

Tabla 3.10. Composición cristalina mineralógica promedio de las muestras analizadas por difracción de rayos X

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Como se observa en la tabla 3.9; en algunos casos existen variaciones considerables del porcentaje de actividad puzolánica en relación con la temperatura de activación y en otros casos esta diferencia no es muy marcada, por lo que se deberán validar estos datos con los obtenidos más adelante por el método de actividad del cemento para poder descartar o aceptar una muestra como válida, tomando en cuenta que el porcentaje mínimo de actividad puzolánica debe ser del 75%.

Nótese además que para el caso de la muestra N° 33, ID: P11, Polvos de Torre de Rocío, no se realiza la activación puzolánica a otros rangos de temperatura diferentes a los 600°C, esto debido a que en el proceso estos polvos son recuperados luego de ser extraídos del pre secador de ciclones (trabaja hasta los 700°C), suponiéndose que su activación térmica es máxima en este punto.

Los difractogramas obtenidos para cada una de las muestras se pueden ver más adelante en el anexo 1.

3.5.5. Determinación del índice de Actividad Puzolánica por el Método del Cemento.

Procedimiento descrito en el documento I.CK – 7.1 – 20 presente en el Manual de Calidad de la Compañía Industrias Guapán S.A. con referencia a la Norma NTE INEN 496 Puzolana: Determinación del Índice de Actividad

Puzolánica: Método del Cemento.

PROPÓSITO.- Establecer el método para determinar el índice de actividad de arcillas y puzolanas en contacto con el Cemento Portland.

ALCANCE.- Este procedimiento comprende las arcillas y puzolanas naturales o calcinadas usadas en obras de construcción, ya sean como tales como aditivos para morteros y hormigones de cemento, o como aditivos para morteros de cal hidratada.

DEFINICIONES:

Índice de Actividad Puzolánica.- Es el valor que expresa la capacidad de la puzolana o una arcilla para reaccionar con el hidróxido de calcio, formando compuestos cementicios. El índice de actividad puzolánica se determina calculando las resistencias a la compresión de un mortero de cemento, al cual se añade una proporción determinada de puzolana.

MATERIALES:

Mortero Patrón.- El mortero patrón debe estar constituido por 325g de cemento Portland, 1500g de arena normalizada y 250cm³ de agua.

Mortero de Ensayo.- El mortero de ensayo debe estar constituido por 325g de cemento Portland, 1500g de arena normalizada, 250cm³ de agua y una cantidad P de puzolana o arcilla que se determina mediante la siguiente fórmula:

$$P = \frac{175p}{p1}$$

Siendo:

- P: cantidad de arcilla o puzolana en gramos.
- p : densidad de la arcilla o puzolana.

- p 1: densidad del cemento Portland.

INSTRUCCIONES:

Este procedimiento se realiza de acuerdo al documento NTE INEN 0488:09 Determinación de la Resistencia a la Compresión, el cual se describe más adelante en el punto 3.5.6.2.

CÁLCULOS.- Con los valores individuales obtenidos en los ensayos para cada una de las muestras, a los 28 días calcular, para cada tipo de muestras, el valor promedio de las resistencias a la compresión de MPa (kgf/cm²).

El índice de actividad puzolánica con Cemento Portland se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Ip = \frac{R}{R1} \times 100$$

Dónde:

- *Ip*: Índice de actividad puzolánica con cemento Portland en %.
- *R*: Promedio de resistencia a la compresión de las muestras de mortero de ensayo, en MPa.
- *R1*: Promedio de resistencia a la compresión de las muestras de mortero de patrón, en MPa.

3.5.6. Determinación de las características de calidad del cemento según Norma NTE INEN 490.

Las características a continuación descritas fueron desarrolladas en base a los requerimientos establecidos en la Norma NTE INEN 490:2011, quinta revisión, en concordancia con el Manual de Calidad de la Compañía Industrias Guapán S.A.



3.5.6.1. Determinación de la superficie específica según Método Blaine

PROPÓSITO.- Establecer una instrucción para la determinación correcta de la superficie específica.

ALCANCE.- Esta instrucción se aplicará a la muestra del producto cemento.

DEFINICIONES:

Superficie específica.- La superficie específica es la suma de las superficies de las partículas de un gramo de muestra, la misma que utiliza permeabilimetría y se lo realiza en el “Permeabilímetro o Aparato de Blaine”, el que consiste de una célula de permeabilidad, un manómetro, un líquido manométrico (aceite de vaselina), un disco perforado y un émbolo.

EQUIPO:

- Permeabilímetro Blaine.
- Papel filtro
- Cronómetro
- Termómetro

INSTRUCCIONES:

Inicialmente se pesa una cantidad de muestra exactamente igual a la de la muestra patrón (2.9753g), según procedimientos para calibrar el aparato, y se coloca un papel filtro sobre el disco perforado y la muestra en la célula de permeabilidad.



Figura 3.23. Equipo Permeabilímetro Blaine.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Luego, se nivela cuidadosamente la muestra mediante ligeros golpes en las paredes de la célula, y en seguida se cubre la muestra con otro papel filtro.

A continuación se debe bajar cuidadosamente el pistón hasta que su reborde esté en contacto con la parte superior de la célula y luego levantarlo sin dispersar el cemento.

Adicionalmente se registra exactamente la temperatura del laboratorio antes de comenzar la determinación, se conecta herméticamente la célula con el manómetro, cuidando que no se altere la capa del cemento y se expulsa lentamente el aire contenido en el brazo del manómetro, hasta que el líquido llegue a nivel de la primera marca.

Posteriormente se comienza a registrar el tiempo con el cronómetro en el instante en que el menisco del líquido llegue a la marca inmediatamente inferior

(ver Figura 3.23.).

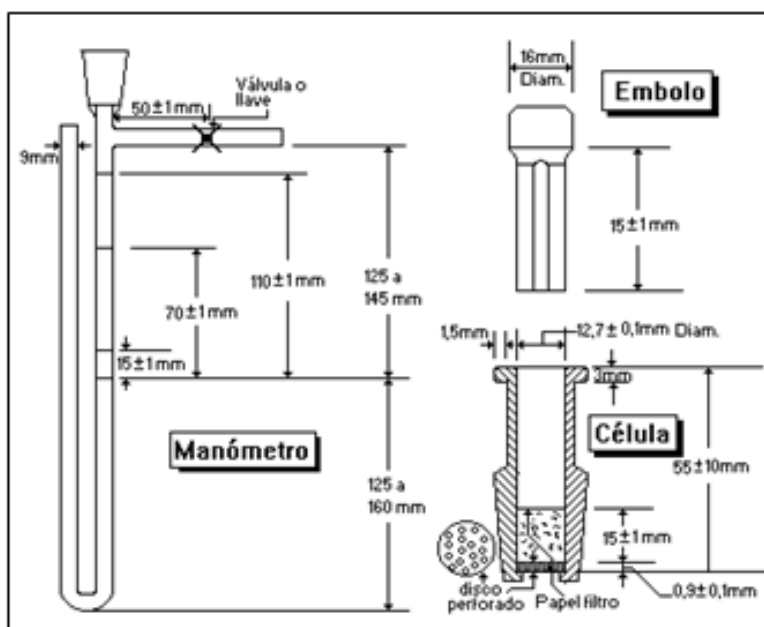


Figura 3.24. Esquema para el uso del Permeabilímetro Blaine.

Fuente: Manual de Calidad Compañía Industrias Guapán S.A. (2006).

Finalmente se detiene el cronómetro cuando el menisco llega a la penúltima marca y se registra el tiempo transcurrido.

CÁLCULOS.- La superficie específica se calcula con las siguientes fórmulas:

$$A = K \frac{(n^3)^{\frac{1}{2}} t^{\frac{1}{2}}}{\gamma(1-n)(\beta)^{\frac{1}{2}}}$$

$$K = \frac{A_p \gamma_p \frac{1-n_p}{(n_p^3)^{\frac{1}{2}} (t_p)^{\frac{1}{2}}} \beta_p^{\frac{1}{2}}}{1}$$

Siendo:

- A = Superficie específica en cm²/gr.
- t = Intervalo de tiempo en el ensayo.
- β = Viscosidad en el aire (poises) a la Temperatura ambiente (T).



- γ = Peso específico muestra ensayada.
- n = Porosidad de la capa de material ensayada.
- A_p = Superficie específica cm^2/gr de cemento patrón.
- β_p = Viscosidad en el aire (poises) a temperatura ambiente de la muestra patrón.
- t_p = Intervalo de tiempo en el ensayo de la muestra patrón.
- n_p = porosidad fijada en capa de la muestra patrón.
- γ_p = Peso específico de la muestra patrón.

Ejemplo: Así, por ejemplo, para la muestra de cemento patrón utilizado para la elaboración de los morteros de prueba para la resistencia a la compresión, el valor obtenido fue:

$$A = 3227 \text{ cm}^2/\text{g}$$

3.5.6.2. Determinación de la resistencia a la Compresión.

Este procedimiento está descrito en el documento NTE INEN 488:09 y ajustado para los requerimientos del laboratorio en el Manual de Calidad de la Compañía Industrias Guapán S.A. de la siguiente manera:

PROPÓSITO.- Establecer una instrucción para la determinación correcta de la resistencia a la compresión.

ALCANCE.- Se aplica al producto cemento (Expedición, fabricación y de despacho a granel).

DEFINICIONES:

La resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico se hace usando especímenes cúbicos de 50 mm de arista. La prueba se basa en la aplicación de una carga progresiva de compresión a un espécimen cúbico de mortero de cemento, hasta determinar su resistencia máxima admisible.

Flujo.- Para efectos de este procedimiento, es el aumento en el diámetro promedio de la masa del mortero, determinado con un calibrador, medido en por lo menos 4 diámetros, a intervalos equidistantes y expresados como porcentaje del diámetro original.

Resistencia a la compresión.- Es la aplicación de una carga progresiva de compresión a un espécimen cúbico de mortero de cemento, hasta determinar su resistencia máxima admisible.

Mortero de cemento.- Es la mezcla de arena normalizada, agua y cemento en cantidades normadas.

EQUIPO:

- Balanza.
- Pesas.
- Moldes de los cubos.
- Mesa y Molde de flujo.
- Prensa.
- Espátula.
- Probetas Graduadas.
- Tamices.
- Mezcladora, recipiente de mezclado, paleta.
- Apisonador.
- Calibrador.

INSTRUCCIONES:

➤ **Mezclado**

Se pesa el cemento y la arena en una proporción de una parte de cemento por 2,75 partes de arena normalizada seca. Así por ejemplo, para obtener 6 cubos de ensayo las cantidades serían 500 g de cemento y 1375 g de arena; para 9 cubos

deben ser 740 g de cemento y 2035 g de arena. La cantidad de agua debe ser lo suficiente para producir un flujo entre 100 y 115. Por ejemplo para 6 cubos unos 250cm³ de agua y para 9 cubos unos 360cm³.



Figura 3.25. Arena normalizada, cemento patrón y agua destilada usados en la elaboración de morteros para ensayos de resistencia a la compresión.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Se limpian los moldes y se cubren con aceite mineral, se los ensambla y se retira el excedente de aceite.



Figura 3.26. Moldes metálicos usados en la elaboración de morteros para ensayos de resistencia a la compresión.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Luego se procede a la preparación del mortero, de la siguiente manera:

Se coloca la paleta mezcladora y el recipiente de mezclado en la posición de trabajo, cuidando que estén limpios y secos. A continuación se vierte toda el agua de amasado en el recipiente y se agrega todo el cemento requerido para mezclar durante 30 segundos a velocidad lenta (mezcladora de dos velocidades).

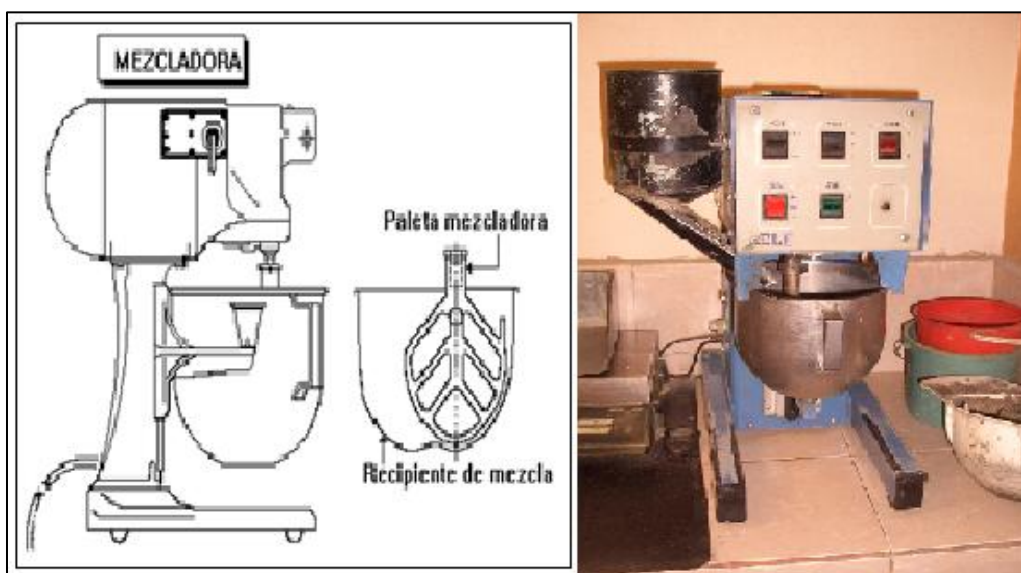


Figura 3.27. Máquina mezcladora de dos velocidades.

Fuente: Manual de Calidad Compañía Industrias Guapán S.A. (2006).

Se agrega lentamente toda la arena requerida en un período de 30 segundos mientras se mezcla a velocidad lenta. De inmediato se debe cambiar a velocidad rápida y mezclar durante 30 segundos más.

Adicionalmente, se detiene la mezcladora durante 90 segundos; durante los primeros 15 segundos se debe arrastrar con la espátula todo el mortero adherido a la pared del recipiente hacia el fondo y tapar el recipiente durante los 75 segundos restantes.

Finalmente se mezcla nuevamente durante 60 segundos a velocidad rápida.



Figura 3.28. Proceso de mezclado para la elaboración de morteros para ensayos de resistencia a la compresión.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

➤ Llenado

A continuación el llenado de los moldes procede de la siguiente manera:

Se coloca una capa de mortero de más o menos 25 mm de espesor en cada compartimiento cúbico. Se apisona 32 veces el mortero en cada compartimiento, en aproximadamente 10s, en 4 etapas de 8 golpes cada una. Los golpes de cada etapa deben darse siguiendo una dirección perpendicular a los de la anterior (ver Figura 3.29).

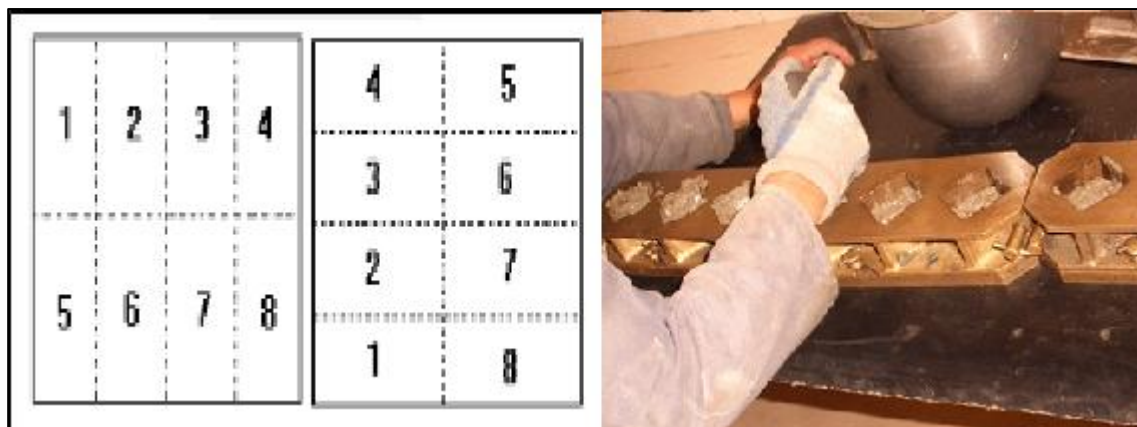


Figura 3.29. Método de apisonamiento de morteros para la determinación de resistencia a la compresión.

Fuente: Manual de Calidad Compañía Industrias Guapán S.A. (2006).

Una vez apisonados todos los compartimentos se debe llenar con una segunda capa y apisonar como se hizo anteriormente. Durante el apisonado de la segunda etapa, recoger el mortero desprendido hacia afuera de los moldes después de cada etapa, con ayuda de los dedos, pero llevando las manos enguantadas.

Al finalizar la compactación, las caras superiores de los cubos, deben quedar un poco más altas que los bordes superiores de los moldes. El mortero depositado en los bordes debe retirarse de los compartimentos con la ayuda de una espátula y la superficie de los cubos debe alisarse con un palustre, sostenido casi perpendicularmente, con un movimiento de vaivén a lo largo de la longitud del mismo.



Figura 3.30. Acabado de morteros para la determinación de resistencia a la compresión.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Terminada la operación de llenado, colocar el conjunto formado por cubos y moldes en la cámara húmeda de 20 a 24 horas, con las caras superiores de los moldes expuestas al aire húmedo, pero protegidas contra la eventual caída de gotas de agua.



Figura 3.31. Cámara húmeda para almacenamiento de morteros para la determinación de resistencia a la compresión.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Si los cubos no van a ser ensayados a las 24 horas, deben sumergirse en agua dentro de tanques de almacenamiento contruidos de material resistente a la corrosión. Antes de colocación en los tanques codificar los cubos. El agua debe mantenerse limpia por renovación frecuente.



Figura 3.32. Tanques de almacenamiento (28 días) para morteros usados en la determinación de la resistencia a la compresión.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Una vez cumplido el tiempo de 24 horas en la cámara húmeda o de 3, 7, o 28 días en los tanques de agua, según sea el caso, se procede al ensayo de la compresión.

Si son los cubos de 24 horas, hay que pasarlos inmediatamente a la máquina de prueba y si se sacan varios al mismo tiempo, se les debe cubrir con una toalla húmeda hasta el momento de ensayo. En el caso de otros cubos deben sacarse del recipiente de almacenamiento y probarse inmediatamente. Si se sacan varios al mismo tiempo, deben sumergirse totalmente en agua a una temperatura de $23\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, hasta el momento del ensayo.

Todos los cubos deben ser probados dentro de las tolerancias de tiempo que se indican en la siguiente tabla:

Edad del Cubo	Tolerancia Admisible (horas)
24 horas	$\pm 1/2$ hora
3 días	± 1 hora
7 días	± 3 horas
28 días	± 12 horas

Tabla 3.11. Tolerancias admisibles para ruptura de probetas en el ensayo de Resistencia a la Ruptura.

Fuente: Manual de Calidad Compañía Industrias Guapán S.A. (2006).

Las superficies de los cubos deben secarse y los granos de arena desprendidos, o las incrustaciones deben retirarse de las caras que van a estar en contacto con los bloques de apoyo de la máquina de ensayo.

Se debe comprobar, por medio de una regla, que estas caras sean perfectamente planas. En caso de tener curvatura apreciable, deben esmerilarse hasta obtener superficies planas. Si esto no es posible se debe desechar el cubo.

Se coloca cuidadosamente el cubo centrándolo debajo del bloque superior de la máquina de ensayo y se aplica una carga en la máquina progresivamente, hasta el momento en que se deforme el cubo, momento en el cual la aguja indicadora de carga regresa a su posición original, quedando señalado el valor de la presión con otra aguja, la misma que es arrastrada el momento de la prueba por la aguja anterior y se registra el valor.

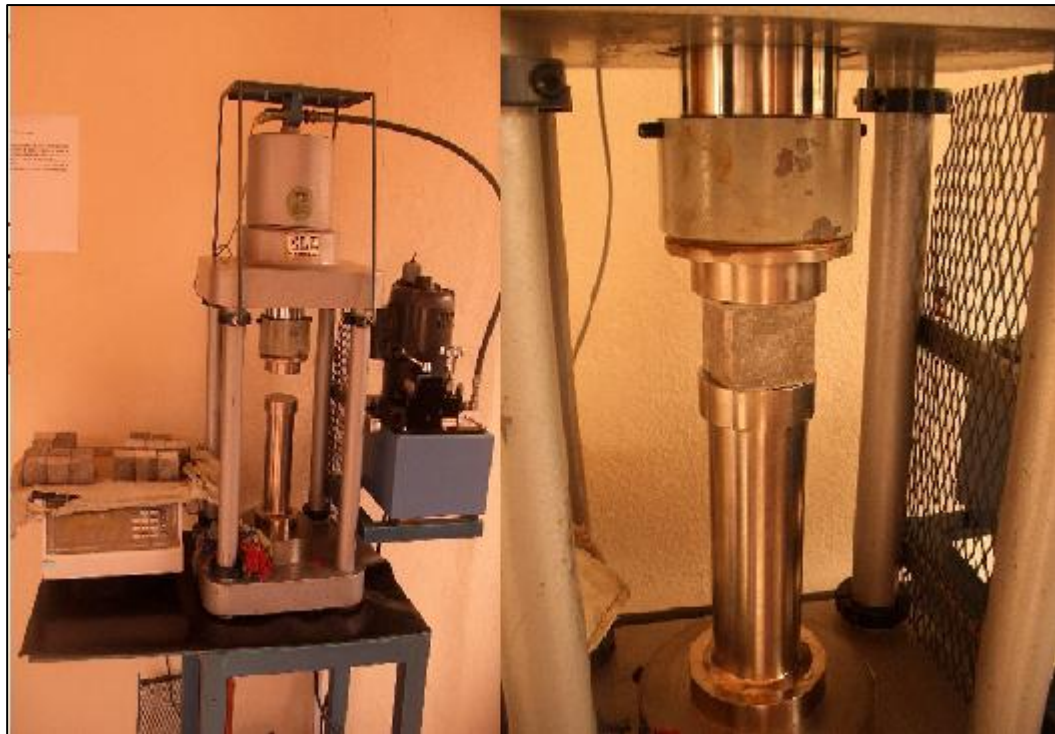


Figura 3.33. Prensa hidráulica de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

CALCULOS.- La carga máxima soportada se divide para el área del cubo (25cm^2) y se expresa en MPa. Si el equipo expresa la medida en kgf/cm^2 , ese resultado se lo divide para el factor de corrección 10.2 y de esta manera obtenemos el valor de la fuerza aplicada por unidad de área directamente en MPa.

$$\text{Fuerza por unidad de área} = \frac{\frac{CM}{A}}{10,2}$$

Dónde:

- CM: carga máxima soportada en kgf
- A: área del cubo en cm^2

El porcentaje de actividad puzolánica viene dado por:

$$\% \text{ de actividad puzolánica} = \frac{FRm}{FRp} \times 100$$

Dónde:

- FRm: Fuerza de ruptura para la muestra en MPa.
- FRp: Fuerza de ruptura para el cemento patrón en MPa.

Ejemplo: Así, para la muestra de Puzolana de Latacunga P3 se tienen los siguientes valores:

- CM: 6310 kgf (promedio)
- A: 25 cm²

$$\text{Fuerza por unidad de área} = \frac{\frac{6310}{25}}{10,2}$$

$$\text{Fuerza por unidad de área} = 24,7450 \text{ MPa}$$

- FRm: 24,7450 MPa.
- FRp: 32 MPa.

$$\% \text{ de actividad puzolánica} = \frac{24,1960}{32} \times 100$$

$$\% \text{ de actividad puzolánica} = 77,32 \%$$

En la tabla que se muestra a continuación se indican los pesos de cada uno de los elementos que intervienen en la elaboración de los morteros para ser ensayados.

Peso de los elementos para elaboración de morteros								
N°	Id	Nombre de la muestra	Peso de la Muestra	% de la muestra en mezcla	Elaboración		Ruptura	
					Fecha	Hora	Fecha	Hora
1	P2	Cemento Patrón	500,0000	0,0000	40963,0000	0,4167	40991,0000	0,4167
2	P3	Puzolana Latacunga	136,7190	6,1816	40967,0000	0,3750	40995,0000	0,3750
3	P4	Puzolana Challuabamba	141,6350	6,3896	40967,0000	0,3750	40995,0000	0,3750
4	P5	Puzolana Deleg	140,9170	6,3593	40968,0000	0,4167	40996,0000	0,4167
5	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	141,6350	6,3896	40968,0000	0,4167	40996,0000	0,4167
6	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	139,4810	6,2986	40969,0000	0,4583	40997,0000	0,4583
7	P8	Arcilla Guapán	138,8180	6,2705	40969,0000	0,4583	40997,0000	0,4583
8	P9	Caolín Tierra Blanca	130,9190	5,9349	40969,0000	0,4583	40997,0000	0,4583
9	P10	Arcilla Taday	141,6350	6,3896	40970,0000	0,5417	40998,0000	0,5417
10	P11	Polvos Torre de Rocio	142,3530	6,4200	40970,0000	0,5417	40998,0000	0,5417
11	P3-5	Deleg - Latacunga	13,6720	0,6182	40973,0000	0,4583	41001,0000	0,4583
12	P3-9	Tierra Blanca - Latacunga	13,6720	0,6182	40973,0000	0,4583	41001,0000	0,4583
13	P3-10	Taday - Latacunga	13,6720	0,6182	40973,0000	0,4583	41001,0000	0,4583
14	P3-4	Challuabamba - Latacunga	13,6720	0,6182	40974,0000	0,5417	41002,0000	0,5417
15	P3-6	Andina sin Esmalte - Latacunga	13,6720	0,6182	40974,0000	0,5417	41002,0000	0,5417
16	P3-7	Andina con Esmalte - Latacunga	13,6720	0,6182	40974,0000	0,5417	41002,0000	0,5417
17	P3-8	Guapán - Latacunga	13,6720	0,6182	40975,0000	0,5625	41003,0000	0,5625
18	P3-11	Polvos Torre de Rocio - Latacunga	13,6720	0,6182	40975,0000	0,5625	41003,0000	0,5625
19	P0	Cemento Patrón	325,0000	-	-	-	-	-
20	N	Sílice normalizada	1500,0000	-	-	-	-	-
21	A	Agua	250,0000	-	-	-	-	-
22	P3	Puzolana Latacunga	123,047	-	-	-	-	-

Tabla 3.12. Pesos de los elementos minerales para la elaboración de morteros de ensayo.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Se elaboraron 18 probetas para ensayo; una para cada material y una con una combinación de cada material con puzolana de Latacunga. Los materiales arcillosos para la elaboración no fueron activados. A más de esto, se realizaron probetas con cemento patrón con el fin de recolectar datos para el estudio de la actividad puzolánica. Nótese que el cemento patrón, la sílice normalizada, la puzolana y el agua poseen los mismos pesos para cada una de las probetas combinadas, asegurándonos de esta forma de no variar estos parámetros para cada probeta.

A continuación se muestran los valores obtenidos para el ensayo de resistencia a la compresión:

N°	Id	Nombre de la muestra	Resistencia a la Compresión Kg/cm ²					
			1	2	3	4	5	6
1	P2	Cemento Patrón	8120	7810	8530	8920	7140	8440
2	P3	Puzolana Latacunga	6420	6630	6510	5680	4960	6820
3	P4	Puzolana Challuabamba	5520	4950	4830	5950	5710	5760
4	P5	Puzolana Deleg	5060	3990	4550	5670	4370	5540
5	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	6310	5210	5940	6290	5200	6160
6	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	5520	5550	5660	6110	6160	6250
7	P8	Arcilla Guapán	4200	4810	4680	5100	4650	3620
8	P9	Caolín Tierra Blanca	6590	6050	5980	5520	5570	5500
9	P10	Arcilla Taday	5850	6390	5550	6430	5980	6020
10	P11	Polvos Torre de Rocío	6470	6030	6120	6340	6200	6320
11	P3-5	Deleg - Latacunga	6030	5470	5920	6210	6120	6020
12	P3-9	Tierra Blanca - Latacunga	6370	6230	5980	6170	5790	6110
13	P3-10	Taday - Latacunga	5910	6340	5680	5830	5990	5770
14	P3-4	Challuabamba - Latacunga	5370	5830	5550	6260	5690	6140
15	P3-6	Andina sin Esmalte - Latacunga	5720	4890	5320	5400	5710	5520
16	P3-7	Andina con Esmalte - Latacunga	5970	5390	5960	5660	5280	5270
17	P3-8	Guapán - Latacunga	5270	5320	5390	5010	5210	4020
18	P3-11	Polvos Torre de Rocío - Latacunga	6020	6010	6190	5900	6050	5890

Tabla 3.13. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Como se puede ver en la tabla 3.13, los valores para las seis probetas ensayadas muestran un rango de dispersión considerable por lo que se debe aplicar el método estadístico de desviación estándar 3 sigmas, para descartar los valores más alejados del medio aceptado.

A continuación se muestra una tabla resumen con los cálculos y resultados de los valores obtenidos para la resistencia a la compresión para cada muestra.



Cemento Patrón											
MUESTRA (Kg/cm ²)	MEDIA (Kg/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
7140	8160	1020	1040400	6	170,00	173400,00	416,41	5,103	rechaza		8225
7810		350	122500		58,33	20416,67	142,89	1,751	acepta	7810	
8120		40	1600		6,67	266,67	16,33	0,200	acepta	8120	
8440		280	78400		46,67	13066,67	114,31	1,401	acepta	8440	
8530		370	136900		61,67	22816,67	151,05	1,851	acepta	8530	
8920		760	577600		126,67	96266,67	310,27	3,802	rechaza		

Tabla 3.14. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material Cemento Patrón.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Puzolana Latacunga											
MUESTRA (Kg/cm ²)	MEDIA (Kg/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
4960	6170	1210	1464100	6	201,67	244016,67	493,98	8,006	rechaza		6310
5680		490	240100		81,67	40016,67	200,04	3,242	acepta	5680	
6420		250	62500		41,67	10416,67	102,06	1,654	acepta	6420	
6510		340	115600		56,67	19266,67	138,80	2,250	acepta	6510	
6630		460	211600		76,67	35266,67	187,79	3,044	acepta	6630	
6820		650	422500		108,33	70416,67	265,36	4,301	rechaza		

Tabla 3.15. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material Puzolana de Latacunga.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).



Puzolana Challuabamba											
MUESTRA (Kgf/cm ²)	MEDIA (Kgf/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
4830	5453,33	623,33	388544,44	6	103,89	64757,41	254,47	4,666	rechaza		5578,00
4950		503,33	253344,44		83,89	42224,07	205,48	3,768	acepta	4950	
5520		66,67	4444,44		11,11	740,74	27,22	0,499	acepta	5520	
5710		256,67	65877,78		42,78	10979,63	104,78	1,921	acepta	5710	
5760		306,67	94044,44		51,11	15674,07	125,20	2,296	acepta	5760	
5950		496,67	246677,78		82,78	41112,96	202,76	3,718	acepta	5950	

Tabla 3.16. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material Puzolana de Challuabamba.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Puzolana Déleg											
MUESTRA (Kgf/cm ²)	MEDIA (Kgf/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
3990	4863,33	873,33	762711,11	6	145,56	127118,52	356,54	7,331	rechaza		4805
4370		493,33	243377,78		82,22	40562,96	201,40	4,141	rechaza		
4550		313,33	98177,78		52,22	16362,96	127,92	2,630	acepta	4550	
5060		196,67	38677,78		32,78	6446,30	80,29	1,651	acepta	5060	
5540		676,67	457877,78		112,78	76312,96	276,25	5,680	rechaza		
5670		806,67	650711,11		134,44	108451,85	329,32	6,771	rechaza		

Tabla 3.17. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material Puzolana de Déleg.

Fuente: Delgado Negrete, (2012).



Chamota Cerámica Andina sin Esmalte											
MUESTRA (Kgf/cm ²)	MEDIA (Kgf/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
5200	5851,67	651,67	424669,44	6	108,61	70778,24	266,04	4,546	rechaza		6175
5210		641,67	411736,11		106,94	68622,69	261,96	4,477	rechaza		
5940		88,33	7802,78		14,72	1300,46	36,06	0,616	acepta	5940	
6160		308,33	95069,44		51,39	15844,91	125,88	2,151	acepta	6160	
6290		438,33	192136,11		73,06	32022,69	178,95	3,058	acepta	6290	
6310		458,33	210069,44		76,39	35011,57	187,11	3,198	acepta	6310	

Tabla 3.18. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material Chamota Cerámica Andina sin Esmalte.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Chamota Cerámica Andina con Esmalte											
MUESTRA (Kgf/cm ²)	MEDIA (Kgf/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
5520	5875	355	126025	6	59,17	21004,17	144,93	2,467	acepta	5520	5875
5550		325	105625		54,17	17604,17	132,68	2,258	acepta	5550	
5660		215	46225		35,83	7704,17	87,77	1,494	acepta	5660	
6110		235	55225		39,17	9204,17	95,94	1,633	acepta	6110	
6160		285	81225		47,50	13537,50	116,35	1,980	acepta	6160	
6250		375	140625		62,50	23437,50	153,09	2,606	acepta	6250	

Tabla 3.19. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material Chamota Cerámica Andina con Esmalte.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).



Arcilla Guapán											
MUESTRA (Kgf/cm ²)	MEDIA (Kgf/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
3620	4510	890	792100	6	148,33	132016,67	363,34	8,056	rechaza		4585
4200		310	96100		51,67	16016,67	126,56	2,806	acepta	4200	
4650		140	19600		23,33	3266,67	57,15	1,267	acepta	4650	
4680		170	28900		28,33	4816,67	69,40	1,539	acepta	4680	
4810		300	90000		50,00	15000,00	122,47	2,716	acepta	4810	
5100		590	348100		98,33	58016,67	240,87	5,341	rechaza		

Tabla 3.20. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material Arcilla Guapán.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Caolín Tierra Blanca											
MUESTRA (Kgf/cm ²)	MEDIA (Kgf/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
5500	5868,33	368,33	135669,44	6	61,39	22611,57	150,37	2,562	acepta	5500	5724
5520		348,33	121336,11		58,06	20222,69	142,21	2,423	acepta	5520	
5570		298,33	89002,78		49,72	14833,80	121,79	2,075	acepta	5570	
5980		111,67	12469,44		18,61	2078,24	45,59	0,777	acepta	5980	
6050		181,67	33002,78		30,28	5500,46	74,17	1,264	acepta	6050	
6590		721,67	520802,78		120,28	86800,46	294,62	5,020	rechaza		

Tabla 3.21. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material Caolín Tierra Blanca.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).



Arcilla Taday											
MUESTRA (Kgf/cm ²)	MEDIA (Kgf/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
5550	6036,67	486,67	236844,44	6	81,11	39474,07	198,68	3,291	acepta	5550	6036,67
5850		186,67	34844,44		31,11	5807,41	76,21	1,262	acepta	5850	
5980		56,67	3211,11		9,44	535,19	23,13	0,383	acepta	5980	
6020		16,67	277,78		2,78	46,30	6,80	0,113	acepta	6020	
6390		353,33	124844,44		58,89	20807,41	144,25	2,390	acepta	6390	
6430		393,33	154711,11		65,56	25785,19	160,58	2,660	acepta	6430	

Tabla 3.22. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material Arcilla de Taday.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Polvos Torre de Rocío											
MUESTRA (Kgf/cm ²)	MEDIA (Kgf/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
6030	6246,67	216,67	46944,44	6	36,11	7824,07	88,45	1,416	acepta	6030	6246,67
6120		126,67	16044,44		21,11	2674,07	51,71	0,828	acepta	6120	
6200		46,67	2177,78		7,78	362,96	19,05	0,305	acepta	6200	
6320		73,33	5377,78		12,22	896,30	29,94	0,479	acepta	6320	
6340		93,33	8711,11		15,56	1451,85	38,10	0,610	acepta	6340	
6470		223,33	49877,78		37,22	8312,96	91,18	1,460	acepta	6470	

Tabla 3.23. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material Polvos de la Torre de Rocío.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).



Déleg – Latacunga											
MUESTRA (Kgf/cm ²)	MEDIA (Kgf/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
5470	5961,67	491,67	241736,11	6	81,94	40289,35	200,72	3,367	acepta	5470	5961,67
5920		41,67	1736,11		6,94	289,35	17,01	0,285	acepta	5920	
6020		58,33	3402,78		9,72	567,13	23,81	0,399	acepta	6020	
6030		68,33	4669,44		11,39	778,24	27,90	0,468	acepta	6030	
6120		158,33	25069,44		26,39	4178,24	64,64	1,084	acepta	6120	
6210		248,33	61669,44		41,39	10278,24	101,38	1,701	acepta	6210	

Tabla 3.24. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material mezcla Puzolanas Déleg – Latacunga.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Tierra Blanca – Latacunga											
MUESTRA (Kgf/cm ²)	MEDIA (Kgf/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
5790	6108,33	318,33	101336,11	6	53,06	16889,35	129,96	2,128	acepta	5790	6108,33
5980		128,33	16469,44		21,39	2744,91	52,39	0,858	acepta	5980	
6110		1,67	2,78		0,28	0,46	0,68	0,011	acepta	6110	
6170		61,67	3802,78		10,28	633,80	25,18	0,412	acepta	6170	
6230		121,67	14802,78		20,28	2467,13	49,67	0,813	acepta	6230	
6370		261,67	68469,44		43,61	11411,57	106,82	1,749	acepta	6370	

Tabla 3.25. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material mezcla Caolín Tierra Blanca – Puzolana Latacunga.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).



Taday – Latacunga											
MUESTRA (Kg/cm ²)	MEDIA (Kg/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kg/cm ²	Kg/cm ²
5680	5920	240	57600	6	40,00	9600,00	97,98	1,655	acepta	5680	5920
5770		150	22500		25,00	3750,00	61,24	1,034	acepta	5770	
5830		90	8100		15,00	1350,00	36,74	0,621	acepta	5830	
5910		10	100		1,67	16,67	4,08	0,069	acepta	5910	
5990		70	4900		11,67	816,67	28,58	0,483	acepta	5990	
6340		420	176400		70,00	29400,00	171,46	2,896	acepta	6340	

Tabla 3.26. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material mezcla Arcilla Taday – Puzolana Latacunga.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Challuabamba – Latacunga											
MUESTRA (Kg/cm ²)	MEDIA (Kg/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kg/cm ²	Kg/cm ²
5370	5806,67	436,67	190677,78	6	72,78	31779,63	178,27	3,070	acepta	5370	5806,67
5550		256,67	65877,78		42,78	10979,63	104,78	1,805	acepta	5550	
5690		116,67	13611,11		19,44	2268,52	47,63	0,820	acepta	5690	
5830		23,33	544,44		3,89	90,74	9,53	0,164	acepta	5830	
6140		333,33	111111,11		55,56	18518,52	136,08	2,344	acepta	6140	
6260		453,33	205511,11		75,56	34251,85	185,07	3,187	acepta	6260	

Tabla 3.27. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material mezcla Puzolanas Challuabamba - Latacunga.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).



Andina sin Esmalte – Latacunga											
MUESTRA (Kg/cm ²)	MEDIA (Kg/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kg/cm ²	Kg/cm ²
4890	5426,67	536,67	288011,11	6	89,44	48001,85	219,09	4,037	rechaza		5534
5320		106,67	11377,78		17,78	1896,30	43,55	0,802	acepta	5320	
5400		26,67	711,11		4,44	118,52	10,89	0,201	acepta	5400	
5520		93,33	8711,11		15,56	1451,85	38,10	0,702	acepta	5520	
5710		283,33	80277,78		47,22	13379,63	115,67	2,132	acepta	5710	
5720		293,33	86044,44		48,89	14340,74	119,75	2,207	acepta	5720	

Tabla 3.28. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material mezcla Chamota Cerámica Andina sin Esmalte - Puzolana Latacunga.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Andina con Esmalte – Latacunga											
MUESTRA (Kg/cm ²)	MEDIA (Kg/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kg/cm ²	Kg/cm ²
5270	5588,33	318,33	101336,11	6	53,06	16889,35	129,96	2,326	acepta	5270	5588,33
5280		308,33	95069,44		51,39	15844,91	125,88	2,252	acepta	5280	
5390		198,33	39336,11		33,06	6556,02	80,97	1,449	acepta	5390	
5660		71,67	5136,11		11,94	856,02	29,26	0,524	acepta	5660	
5960		371,67	138136,11		61,94	23022,69	151,73	2,715	acepta	5960	
5970		381,67	145669,44		63,61	24278,24	155,81	2,788	acepta	5970	

Tabla 3.29. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material mezcla Chamota Andina con Esmalte - Puzolana Latacunga.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).



Guapán – Latacunga											
MUESTRA (Kg/cm ²)	MEDIA (Kg/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
4020	5036,67	1016,67	1033611,11	6	169,44	172268,52	415,05	8,241	rechaza		5240
5010		26,67	711,11		4,44	118,52	10,89	0,216	acepta	5010	
5210		173,33	30044,44		28,89	5007,41	70,76	1,405	acepta	5210	
5270		233,33	54444,44		38,89	9074,07	95,26	1,891	acepta	5270	
5320		283,33	80277,78		47,22	13379,63	115,67	2,297	acepta	5320	
5390		353,33	124844,44		58,89	20807,41	144,25	2,864	acepta	5390	

Tabla 3.30. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material mezcla Arcilla Guapán - Puzolana Latacunga.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Polvos Torre de Rocío – Latacunga											
MUESTRA (Kg/cm ²)	MEDIA (Kg/cm ²)	Xi- Xmedia	(Xi-Xmedia) ²	Número de datos	Desviación media	Varianza	Desviación estándar	Dispersión	Criterio de Aceptación	Valores Válidos	Promedio
Xi	Xmedia			n	d	δ^2	δ	%		Kgf/cm ²	Kgf/cm ²
5890	6010	120	14400	6	20,00	2400,00	48,99	0,815	acepta	5890	6010
5900		110	12100		18,33	2016,67	44,91	0,747	acepta	5900	
6010		0	0		0,00	0,00	0,00	0,000	acepta	6010	
6020		10	100		1,67	16,67	4,08	0,068	acepta	6020	
6050		40	1600		6,67	266,67	16,33	0,272	acepta	6050	
6190		180	32400		30,00	5400,00	73,48	1,223	acepta	6190	

Tabla 3.31. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión del material mezcla Polvos de Torre de Rocío - Puzolana Latacunga.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Como se aprecia en cada una de las tablas de resultados, los valores descartados se encuentran sustituidos por espacios en blanco para el cálculo del promedio final. Tomando en cuenta este criterio y análisis se presentan a continuación los resultados del porcentaje de actividad puzolánica para cada una de las mezclas para mortero ensayadas:

ACTIVIDAD PUZOLÁNICA - MÉTODO DEL CEMENTO											
N°	Id	Nombre de la muestra	Resistencia a la Ruptura (kgf/cm ²)							Fuerza/Area (Mpa)	Actividad Puzolánica (%)
			1	2	3	4	5	6	Promedio		
1	P2	Cemento Patrón	-	7810	8120	8440	8530	-	8225,000	32,2549	100,00%
2	P3	Puzolana Latacunga	-	5680	6420	6510	6630	-	6310,000	24,7451	76,72%
3	P4	Puzolana Challuabamba	-	4950	5520	5710	5760	5950	5578,000	21,8745	67,82%
4	P5	Puzolana Deleg	-	-	4550	5060	-	-	4805,000	18,8431	58,42%
5	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	-	-	5940	6160	6290	6310	6175,000	24,2157	75,08%
6	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	5520	5550	5660	6110	6160	6250	5875,000	23,0392	71,43%
7	P8	Arcilla Guapán	-	4200	4650	4680	4810	-	4585,000	17,9804	55,74%
8	P9	Caolín Tierra Blanca	5500	5520	5570	5980	6050	-	5724,000	22,4471	69,59%
9	P10	Arcilla Taday	5550	5850	5980	6020	6390	6430	6036,667	23,6732	73,39%
10	P11	Polvos Torre de Rocío	6030	6120	6200	6320	6340	6470	6246,667	24,4967	75,95%
11	P3-5	Deleg - Latacunga	5470	5920	6020	6030	6120	6210	5961,667	23,3791	72,48%
12	P3-9	Tierra Blanca - Latacunga	5790	5980	6110	6170	6230	6370	6108,333	23,9542	74,27%
13	P3-10	Taday - Latacunga	5680	5770	5830	5910	5990	6340	5920,000	23,2157	71,98%
14	P3-4	Challuabamba - Latacunga	5370	5550	5690	5830	6140	6260	5806,667	22,7712	70,60%
15	P3-6	Andina sin Esmalte - Latacunga	-	5320	5400	5520	5710	5720	5534,000	21,7020	67,28%
16	P3-7	Andina con Esmalte - Latacunga	5270	5280	5390	5660	5960	5970	5588,333	21,9150	67,94%
17	P3-8	Guapán - Latacunga	-	5010	5210	5270	5320	5390	5240,000	20,5490	63,71%
18	P3-11	Polvos Torre de Rocío - Latacunga	5890	5900	6010	6020	6050	6190	6010,000	23,5686	73,07%

Tabla 3.32. Resultados del Porcentaje de Actividad Puzolánica – Método del Cemento.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

3.6. Análisis Químicos

Los análisis químicos se realizaron mediante análisis instrumental de Fluorescencia de Rayos X y los resultados se expresan en forma de óxidos como se puede ver más adelante en la tabla 3.33 de resultados para este ensayo.

3.6.1. Análisis Químico por Fluorescencia de Rayos X

PROPÓSITO.- Establecer un procedimiento para la determinación correcta de análisis de muestras por fluorescencia de Rayos x.



ALCANCE.- Se aplica esta instrucción al análisis de muestras de arcillas, caliza, crudo, clinker, yeso, puzolana y cemento.

DEFINICIONES:

Arcilla.- Suelo o roca sedimentaria, plástica y tenaz cuando se humedece. Se endurece permanentemente cuando se cuece o calcina.

Caliza.- Tipo común de roca sedimentaria compuesta por calcita (carbonato de calcio, CaCO_3). Cuando se calcina (se lleva a alta temperatura) da lugar a cal (óxido de calcio, CaO). La caliza cristalina metamórfica se conoce como mármol.

Yeso.- Mineral común consistente en sulfato de calcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Crudo.- Material calcáreo que ha pasado por el proceso de trituración y molienda, y se ha seleccionado para continuar con el proceso.

Clinker portland.- Es el producto de la cocción a altas temperaturas de una mezcla íntima de materiales arcillosos y calcáreos finamente molidos antes de su cocción y en proporciones determinadas.

Cemento Portland.- Producto de moler a una fineza determinada el clinker Portland con un porcentaje adecuado y no mayor al 5% en masa de yeso. Puede molerse con otros materiales (puzolana, escoria etc.) dando lugar a los diferentes tipos de cemento.

Espectrómetro.- Instrumento que genera, analiza, registra espectros y que permite determinar la composición química por medio de la incidencia de Rayos x sobre la muestra de estudio.

EQUIPO:

- Chapas de aluminio
- Vibromolino

- Prensa Hidráulica
- Pinza
- Plancha térmica
- Bandeja de aluminio
- Espectrómetro

INSTRUCCIONES:

Se toma la muestra preparada según el procedimiento descrito en el punto 3.1. Se coloca una película fina de vaselina en las paredes interiores de la cámara de muestras de la prensa hidráulica para evitar el atascamiento de la chapa de aluminio en el interior de la prensa.

Se llena un 90% la cámara de muestras de la prensa neumática con la muestra a analizar, se cierra y prensa la muestra con el accionamiento de la prensa pulsando el botón principal.

A continuación se abre y acciona nuevamente la prensa para sacar la muestra prensada (pastilla).



Figura 3.34. Prensa neumática para preparación de muestras utilizadas en análisis de Fluorescencia de Rayos X.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Se mantiene por 1 minuto la pastilla sobre una chapa de aluminio en la plancha térmica para eliminar todo residuo de humedad y luego se coloca la(s) muestra(s) en el cargador del espectrómetro identificando su posición y cerrando la compuerta en el menor tiempo posible.



Figura 3.35. Porta-muestra utilizados en el análisis de Fluorescencia de rayos X.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Finalmente se debe correr el software de análisis de la siguiente manera:

- Verificar si se encuentra en el programa OPERADOR.
- Trabajar en la computadora y posesionar el indicador en MEASUREMENT.
- En el cuadro que aparece posesionar en ROUTINE.
- En la pantalla borrar todos los datos que estén cargados.
- Tabular la identificación (códigos) de la siguiente forma:

Código/	Año/	Mes/	Día/	Hora/
TR para trituración	xxxx	Xx	xx	xxhxx
MC para molino de crudo	xxxx	Xx	xx	xxhxx
SC para silo comprobado	xxxx	Xx	xx	xxhxx
AH para alimentación al horno	xxxx	Xx	xx	xxhxx
FF para cemento de fabricación	xxxx	Xx	xx	xxhxx
EE para cemento de expedición	xxxx	Xx	xx	xxhxx
Para caso de más de una muestra seguir a continuación con números ej.				
SC12012/05/21				
SC22012/05/21				

Tabla 3.33. Codificaciones de muestras para análisis de Fluorescencia de Rayos X.

Fuente: Manual de Calidad Compañía Industrias Guapán S.A. (2006).

Posesionarse en la siguiente casilla que se presenta en blanco y seleccionar con ENTER el programa respectivo considerando:

- CRUDO. QAN: Molino de crudo, material de trituración.
- AHORNO. QAN: Material del silo de fabricación y alimentación al horno.
- CLINKER: Para clinker.
- FFYEE: Cemento de fabricación y expedición.

Finalmente pulsar ENTER, verificar que esté correcta la indicación de códigos y posiciones, comprobar que la impresora esté lista y terminar la orden pulsando F10.



Figura 3.36. Difractómetro de rayos X S8-TIGER. Marca Bruker.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos luego del análisis de difracción por Rayos X para las muestras de arcillas y puzolanas tratadas en este estudio.



Muestra:		Puzolana Deleg	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	Arcilla Guapán	Arcilla Taday	Puzolana Latacunga	Puzolana Challuabamba	Caolin Tierra Blanca	Polvos de Torre de Rocio	
Fecha:		14/02/2012	15/02/2012	15/02/2012	15/02/2012	15/02/2012	15/02/2012	15/02/2012	07/03/2012	07/03/2012	
Método de Calibración:		Óxidos	Óxidos	Óxidos	Óxidos	Óxidos	Óxidos	Óxidos	Óxidos	Oxides	
Suma (%):		93,2	91,2	93,9	90,6	88,70	92,3	90,3	90,2	79,3	
Compuesto (%):		93,309	92,424	93,334	84,571	79,006	92,178	92,38	86,067	59,586	
ELEMENTOS PRESENTES EN FORMA DE OXIDOS	SiO2 (%)	62,58	61,02	63,19	60,91	43,33	64,5	56,24	64,11	15,13	
	Al2O3 (%)	22,32	21,11	22,39	15,89	21,87	13,98	15,75	19,87	3,42	
	CaO (%)	2,19	2,46	2,24	3,46	2,13	2,36	5,28	1,42	53,96	
	K2O (%)	2,09	1,96	2,12	1,91	2,2	3,59	1,61	1,96	0,66	
	Fe2O3 (%)	1,06	1,08	1,07	4,58	13,52	2,47	4,56	0,63	2,08	
	Na2O (%)	1,01	1,27	1	1,35	0,13	3,77	3,49	1,55	0,12	
	MgO (%)	0,92	0,99	0,93	1,47	3,52	0,77	2,06	0,08	0,65	
	TiO2 (%)	0,78	0,71	0,76	0,51	1,09	0,37	0,62	0,38	0,2	
	BaO (%)	0,06	0,19	0,06	0,11	0,07	0,12	0,09	0,10		
	P2O5 (%)	0,05	0,05	0,04	0,17	0,1	0,08	0,23	0,05	0,24	
	ZrO2 (%)	0,04	0,001	0,0004	0,0002	64 PPM	0,0002	0,0002	0,0002	16 PPM	
	V2O5 (%)	0,02				0,06		0,02		0,07	
	SrO (%)	0,02	0,0002	0,0002	0,0004	0,0002	0,0004	0,0011	0,03	0,15	
	SO3 (%)		0,01		0,03	0,07	0,09	0,03		2,09	
	NiO (%)	0,0006				0,0003				0,01	
	Cr2O3 (%)	0,01	0,0009	0,0001		0,0011	85 PPM				
	Rb2O (%)	97	90 PPM	92 PPM	67 PPM	20 PPM	0,0002	33 PPM	57 PPM	56 PPM	
	MnO (%)	80	0,0002	56 PPM		0,0007	0,0039	0,0006	0,0007	0,05	
	CoO(%)	79	0,0005	88 PPM			23 PPM	3 PPM			
	ZnO (%)	57	0,0002	49 PPM		0,0001	0,0002	78 PPM	0,0001	66 PPM	0,0002
	CuO (%)	43	35 PPM		63 PPM	0,0002	37 PPM	0,0001	40 PPM	53 PPM	
	PbO (%)		46 PPM							73 PPM	
	Ga2O3 (%)		29PPM		27 PPM				37 PPM		
	Nb2O5 (%)		24PPM								
	As2O3 (%)		2 PPM		21 PPM	0,0001	23 PPM	28 PPM		0,11	
	Cl (%)						0,07	0,05		0,12	
	I (%)									0,1	
	Tl (%)									0,07	
	SeO2 (%)									94 PPM	
	Br (%)									56 PPM	
	MoO3 (%)									56 PPM	

Tabla 3.34. Resultados del análisis de Fluorescencia de rayos X para muestras de arcillas y puzolanas.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).



El análisis, validación y estudio de factibilidad de estos datos se realizarán más adelante en el capítulo cuatro.



IV. RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS.

CAPITULO 4: RESULTADOS

4.1. Análisis y Evaluación de datos experimentales

En este punto se van a evaluar los datos obtenidos de la experimentación y a contrastarlos con los valores óptimos que se indican en la normas INEN para la industria cementera. En el caso de no existir alguna referencia en dichas normas, se procederán a evaluar los datos con los parámetros requeridos en el proceso de producción de la Compañía Industrias Guapán S.A.

Los materiales que no cumplan con uno o varios de los parámetros analizados serán descartados como posibles sustituyentes parciales de la puzolana actualmente utilizada en el proceso de fabricación del cemento.

4.1.1. Humedad

Los valores experimentales obtenidos de los materiales para este parámetro son los descritos anteriormente en la tabla 3.4, de la cual se han extraído únicamente los valores del porcentaje de humedad y se describen a continuación:

N°	Id	Nombre de la muestra	Humedad %
1	P3	Puzolana Latacunga	11,44
2	P4	Puzolana Challuabamba	5,04
3	P5	Puzolana Déleg	11,04
4	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	1,16
5	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	0,10
6	P8	Arcilla Guapán	13,75
7	P9	Caolín Tierra Blanca	26,62
8	P10	Arcilla Taday	21,76
9	P11	Polvos Torre de Rocío	3,82

Tabla 4.1. Porcentajes de humedad de materiales áridos para fabricación de cemento.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).



No existe ninguna especificación normada para el porcentaje de humedad que deben presentar los materiales áridos para la fabricación de cemento Portland; sin embargo, por razones de costos, principalmente al momento de secar y activar el material, la empresa Guapán ha fijado el valor del porcentaje de humedad del 15% como máximo, para de esta manera evitar gastos en tiempo y dinero innecesarios al momento de la activación de arcillas y puzolanas en la producción de cemento. Según este análisis, se ha utilizado el método del semáforo para distinguir a los materiales óptimos para ser utilizados en el proceso.

Nótese que los materiales con menor contenido de agua son los provenientes de la chamota que genera la Compañía Cerámica Andina. Esto se debe a que estos materiales ya fueron sometidos a un proceso de precalcinación y desecación (400°C a 600°C) por la Compañía Cerámica Andina ya que su uso final estaba destinado a la elaboración de vajillas cerámicas.

Los materiales que les siguen en orden de importancia a los anteriores y que podrían ser utilizados como materia prima son los Polvos de la Torre de Rocío de la compañía Guapán, los cuales también fueron sometidos a un proceso de precalcinación a través del aire caliente que sale del horno de calcinación (600°C a 700°C) y la puzolana proveniente de Challuabamba que no ha sufrido ningún proceso de calentamiento.

A continuación están los demás materiales: puzolanas de Déleg y Latacunga, conjuntamente con la arcilla de la Compañía Guapán, los cuales poseen un rango aceptable de humedad. Además de esto, hay que tomar en cuenta que el material de Latacunga es el que actualmente se está utilizando en el proceso de producción de la fábrica.

Finalmente los materiales con un alto contenido de agua son: las arcillas de Taday y el Caolín de Tierra Blanca. Para que estos materiales puedan ser utilizados en el proceso de fabricación se deberá realizar gastos adicionales para desecación y activación. El gasto en estos áridos se vería justificado si los mismos

poseen excelentes características de actividad puzolánica y de resistencia al momento de fabricar el cemento, las cuales van a ser estudiadas más adelante.

4.1.2. Retenido en el Tamiz ASTM 325.

Los valores obtenidos en esta determinación fueron los siguientes:

N°	Id	Nombre de la muestra	Retenido %
1	P3	Puzolana Latacunga	8,63
2	P4	Puzolana Challuabamba	18,71
3	P5	Puzolana Déleg	13,60
4	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	10,85
5	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	12,04
6	P8	Arcilla Guapán	5,43
7	P9	Caolín Tierra Blanca	23,42
8	P10	Arcilla Taday	13,55
9	P11	Polvos Torre de Rocío	13,16

Tabla 4.2. Porcentajes de material retenido en el tamiz ASTM 325 para áridos de fabricación de cemento.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Según norma INEN 490:2011, el fabricante deberá adjuntar a la orden de despacho el análisis del porcentaje retenido en el tamiz ASTM 325 junto con la determinación de la superficie específica por permeabilidad del aire, con un valor máximo del 20% de material retenido en el tamiz 325, ya que con valores mayores a este límite se requiere un tiempo mayor de molienda lo que representa un gasto mayor en tiempo y recursos para la reducción de tamaño de los materiales finos.

Tomando en cuenta este aspecto, los materiales óptimos para el uso son: arcilla Guapán y puzolana Latacunga. Los materiales que pueden también usarse controlando el proceso son: Las chamotas generadas en la Compañía Cerámica Andina, los Polvos de la Torre de Rocío de Industrias Guapán, arcilla Taday y las Puzolanas de Déleg y Challuabamba.

El único material que se encuentra fuera de especificación es el Caolín de Tierra Blanca.

4.1.3. Densidad Real de Arcillas y Puzolanas

Los valores obtenidos en esta determinación fueron:

N°	Id	Nombre de la muestra	Densidad g/cm ³
1	P3	Puzolana Latacunga	2,475
2	P4	Puzolana Challuabamba	2,564
3	P5	Puzolana Déleg	2,551
4	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	2,564
5	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	2,525
6	P8	Arcilla Guapán	2,513
7	P9	Caolín Tierra Blanca	2,370
8	P10	Arcilla Taday	2,451
9	P11	Polvos Torre de Rocío	2,577
10	P12	Cemento Patrón	3,168

Tabla 4.3. Densidad real de arcillas y puzolanas usadas en la fabricación de cemento.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

No se menciona ningún valor de referencia para los valores de densidad real en la normativa INEN, sin embargo se mencionó en el primer capítulo de este estudio un valor aceptable de $2,5\text{g/cm}^3$ para los áridos usados en la fabricación de cemento, a diferencia de la densidad del cemento Portland que debe ser superior a 3g/cm^3 . De ahí que el único material no apto para el uso es el Caolín Tierra Blanca. Los valores de densidad de la puzolana proveniente de Latacunga y la arcilla de Taday se encuentran muy cercanos al límite de la densidad real, sin embargo se pueden utilizar con normalidad estos materiales con la certeza de que su densidad no influirá en las características finales del cemento.

4.1.4. Índice de actividad Puzolánica

Método de Análisis Instrumental por Difractometría de Rayos X

Los valores obtenidos de las muestras durante la experimentación para esta prueba, con los materiales activados a 600°C , fueron los que se describen en la siguiente tabla:

ANÁLISIS DE DIFRACTOMETRÍA POR RAYOS X			
N°	ID	Muestra	% Actividad Puzolánica por Difracción
1	P3	Puzolana Latacunga	87
2	P4	Puzolana Challuabamba	71
3	P5	Puzolana Déleg	74
4	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	75
5	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	75
6	P8	Arcilla Guapán	74
7	P9	Caolín Tierra Blanca	76
8	P10	Arcilla Taday	83
9	P11	Polvos Torre de Rocío	72

Tabla 4.4. Valores del índice de actividad puzolánica obtenidos por el método de Difractometría de rayos X.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Según norma INEN 490:2011, el porcentaje del índice de actividad puzolánica para una muestra con cemento portland a los 28 días debe ser del 75%. Al tomar en cuenta que el análisis por Difractometría es una técnica instrumental y no ha sido sometida a la elaboración de los morteros con cemento patrón, se consiguen valores aproximados no exactos como los que se obtienen mediante el método del cemento que se va analizar más adelante. Tomando en cuenta estas consideraciones se pueden tomar como válidos todos los valores de actividad puzolánica superiores al 75% e inclusive aquellos con un punto inferior al óptimo, quedando invalidados únicamente los materiales: Puzolana de Challuabamba y los Polvos de la Torre de Rocío para nuestro estudio.

Método del Cemento

Por este método, los resultados obtenidos fueron:

ACTIVIDAD PUZOLÁNICA - MÉTODO DEL CEMENTO			
Nº	Id	Nombre de la muestra	Actividad Puzolánica (%)
2	P3	Puzolana Latacunga	77%
3	P4	Puzolana Challuabamba	68%
4	P5	Puzolana Déleg	58%
5	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	75%
6	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	71%
7	P8	Arcilla Guapán	56%
8	P9	Caolín Tierra Blanca	70%
9	P10	Arcilla Taday	73%
10	P11	Polvos Torre de Rocío	76%
11	P3-5	Deleg – Latacunga	72%
12	P3-9	Tierra Blanca – Latacunga	74%
13	P3-10	Taday – Latacunga	72%
14	P3-4	Challuabamba – Latacunga	71%
15	P3-6	Andina sin Esmalte – Latacunga	67%
16	P3-7	Andina con Esmalte - Latacunga	68%
17	P3-8	Guapán – Latacunga	64%
18	P3-11	Polvos Torre de Rocío - Latacunga	73%

Tabla 4.5. Valores del índice de actividad puzolánica obtenidos por el método del Cemento.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Como se puede observar en la tabla, los valores son diferentes a los obtenidos por el método de Difractometría; sin embargo, mantienen una misma tendencia. Cabe resaltar que en el procedimiento por el método del cemento se tiene una mayor exactitud en el análisis ya que los materiales fueron sometidos a las pruebas de resistencia a la compresión y tiempos de fraguado que son los indicadores de la calidad del cemento final obtenido.

Se observa también que se realizaron combinaciones entre los materiales y cada uno de ellos con un común denominador que es la puzolana de Latacunga, la cual posee el índice de actividad puzolánica más alta de todos los materiales,

seguida por la Chamota sin Esmalte de la Cerámica Andina y por los Polvos de la Torre de Rocío de la compañía Guapán que en un principio fueron descartados por el método de Difractometría.

4.1.5. Resistencia a la Compresión (Fraguado 28 Días)

Finalmente, los valores obtenidos para la resistencia a la compresión de las probetas ensayadas a los 28 días de fraguado fueron:

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (28 DÍAS)			
N°	Id	Nombre de la muestra	Fuerza/Área (Mpa)
2	P3	Puzolana Latacunga	25
3	P4	Puzolana Challuabamba	22
4	P5	Puzolana Déleg	19
5	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	24
6	P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	23
7	P8	Arcilla Guapán	18
8	P9	Caolín Tierra Blanca	22
9	P10	Arcilla Taday	24
10	P11	Polvos Torre de Rocío	24
11	P3-5	Deleg – Latacunga	23
12	P3-9	Tierra Blanca – Latacunga	24
13	P3-10	Taday – Latacunga	23
14	P3-4	Challuabamba – Latacunga	23
15	P3-6	Andina sin Esmalte – Latacunga	22
16	P3-7	Andina con Esmalte – Latacunga	22
17	P3-8	Guapán – Latacunga	21
18	P3-11	Polvos Torre de Rocío - Latacunga	24

Tabla 4.6. Valores de resistencia a la compresión (MPa) para probetas a los 28 días de fraguado.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Según norma INEN 490:2011, la fuerza mínima necesaria para provocar la ruptura necesaria de las probetas a los 28 días de fraguado es de 25MPa, para las probetas elaboradas con cemento Portland puzolánico Tipo IP. En la tabla el único

valor que cumple a cabalidad este parámetro es la Puzolana de Latacunga, estando cerca del límite los materiales de Cerámica Andina sin Esmalte, Arcilla Taday, los Polvos de la Torre de Rocío, las combinaciones entre el material de Tierra Blanca – Latacunga y Polvos de la Torre de Rocío – Latacunga.

4.1.6. Análisis Químico por fluorescencia de Rayos X

Este punto no amerita un mayor análisis, ya que todos los resultados mostrados en la tabla 3.34 cumplen con los requisitos establecidos en la norma INEN 152:2012 para áridos de cemento Portland puzolánico Tipo IP. De ahí que desde el punto de vista de composición química, todos los materiales son aptos para ser usados en la fabricación de cemento.

A continuación se muestra una tabla resumen con las características de cada material que puede considerarse óptimo para el uso en la fabricación de cemento, conjuntamente con los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados:

ID	NOMBRE DEL MATERIAL	RESULTADOS DEL ANÁLISIS					
		HUMEDAD (%)	RETENIDO (%)	DENSIDAD REAL (g/cm ³)	ACTIVIDAD POR DIFRACTOMETRIA (%)	ACTIVIDAD POR MÉTODO DEL CEMENTO (%)	RESISTENCIA A LA RUPTURA (MPa)
P3	Puzolana Latacunga	11,44	8,63	2,48	87%	77%	25
P4	Puzolana Challuabamba	5,04	18,71	2,56	71%	68%	22
P5	Puzolana Deleg	11,04	13,60	2,55	74%	58%	19
P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	1,16	10,85	2,56	75%	75%	24
P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	0,10	12,04	2,53	75%	71%	23
P8	Arcilla Guapán	13,75	5,43	2,51	74%	56%	18
P9	Caolín Tierra Blanca	26,62	23,42	2,37	76%	70%	22
P10	Arcilla Taday	21,76	13,55	2,45	83%	73%	24
P11	Polvos Torre de Rocío	3,82	13,16	2,58	72%	76%	24
P3-5	Deleg - Latacunga	-	-	-	-	72%	23
P3-9	Tierra Blanca - Latacunga	-	-	-	-	74%	24
P3-10	Taday - Latacunga	-	-	-	-	72%	23
P3-4	Challuabamba - Latacunga	-	-	-	-	71%	23
P3-6	Andina sin Esmalte - Latacunga	-	-	-	-	67%	22
P3-7	Andina con Esmalte - Latacunga	-	-	-	-	68%	22
P3-8	Guapán - Latacunga	-	-	-	-	64%	21
P3-11	Polvos Torre de Rocío - Latacunga	-	-	-	-	73%	24

Tabla 4.7. Valores experimentales obtenidos para los materiales analizados.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Finalmente, para concluir esta etapa del estudio se anotan a continuación en la siguiente tabla, los materiales que pueden ser considerados óptimos para la producción final de cemento.

N°	ID	NOMBRE DEL MATERIAL	RESULTADOS DEL ANÁLISIS					
			HUMEDAD (%)	RETENIDO (%)	DENSIDAD REAL (g/cm ³)	ACTIVIDAD POR DIFRACTOMETRIA (%)	ACTIVIDAD POR MÉTODO DEL CEMENTO (%)	RESISTENCIA A LA RUPTURA (MPa)
1	P3	Puzolana Latacunga	11,44	8,63	2,48	87%	77%	25
2	P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	1,16	10,85	2,56	75%	75%	24
3	P10	Arcilla Taday	21,76	13,55	2,45	83%	73%	24
4	P11	Polvos Torre de Rocío	3,82	13,16	2,58	72%	76%	24
5	P3-9	Tierra Blanca - Latacunga	-	-	-	-	74%	24
6	P3-11	Polvos Torre de Rocío - Latacunga	-	-	-	-	73%	24

Tabla 4.8. Valores experimentales obtenidos para los materiales óptimos para la producción.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Para el caso del material: Arcilla Taday se podría considerar un proceso de

secado adicional para disminuir la humedad total del árido y poder ser usado en la etapa de molienda de cemento como sustituyente de la puzolana ya que posee buenas cualidades de actividad y resistencia.

Los parámetros que no se ajustan a los valores mínimos establecidos y que se encuentra de color diferente al verde, se pueden ajustar mediante mezclas experimentales hasta obtener las características adecuadas para su uso.

A continuación, en el punto 4.2 se procede al estudio económico con cada uno de los materiales preseleccionados y de igual manera a determinar su factibilidad de explotación, transporte y procesamiento.

4.2. Análisis económico de los resultados obtenidos en la etapa de experimentación

Una vez terminada la etapa de experimentación hemos determinado cuáles son las materias primas que podrían servir en el proceso para remplazar la puzolana de Latacunga en un 10% de su total durante la etapa de molienda de acabado para la fabricación de cemento.

A continuación se presenta una tabla (tabla 4.9.), la cual ha sido proporcionada por el Departamento de Control de Calidad de la empresa, en la cual se toma en cuenta los precios de las diferentes materias primas puestas en la planta y su distancia determinada en el momento de la toma de muestras para el estudio. A partir de estos valores y los resultados de la experimentación, evaluaremos las mejores alternativas para la aplicación del estudio.

ID	NOMBRE DEL MATERIAL	DISTANCIA	Costo por tonelada
		Km	Dólares
P3	Puzolana Latacunga	362	18
P4	Puzolana Challuabamba	13	7
P5	Puzolana Déleg	22	7
P6	Chamota Cerámica Andina sin Esmalte	26	2
P7	Chamota Cerámica Andina con Esmalte	26	2
P8	Arcilla Guapán	0.2	1
P9	Caolín Tierra Blanca	8	5
P10	Arcilla Taday	15	5
P11	Polvos Torre de Rocío	0.2	0.5

Tabla 4.9. Costo de producción por tonelada de los materiales áridos en estudio.

Fuente: Departamento de Calidad Compañía Industrias Guapán S.A. (2012).

Con estos valores tenemos una idea clara de cuáles son los materiales más beneficiosos según el análisis experimental y el costo de producción. Nótese además que en los materiales tomados como sustitutos de la puzolana, el costo de producción es mucho menor que el de la puzolana de Latacunga.

Como dos de las mezclas de experimentación estuvieron cerca de pasar los requerimientos de la normas se debe repetir ensayos con diferentes dosificaciones de estos materiales alternativos hasta alcanzar un punto óptimo. En esta etapa experimental se dosificó 10% del material alternativo con respecto al total de la puzolana que se adiciona al clinker en la etapa de molienda de acabado; por tanto dosificando un porcentaje menor se estima que se encontrará un punto donde las características físicas sean las requeridas por la Norma de calidad, pero éste debe ser sometido a un nuevo proceso de experimentación para obtener datos reales. Siguiendo esta recomendación el beneficio será visualizado dependiendo de la dosificación óptima según el proceso actual de la Empresa, cuyo cemento tiene la siguiente composición:

AÑO 360 DIAS LABORABLES	
TONELADAS DE CEMENTO PROCESADAS POR DIA:	1500
TONELADAS DE CEMENTO PROCESADAS POR AÑO:	540000

Tabla 4.10. Producción (Ton) diaria/anual de cemento en la Compañía Industrias Guapán S.A.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

De estos valores en la Empresa se utiliza puzolana de Latacunga agregada al cemento en un 25% como se describe a continuación:

INDUSTRIAS CEMENTO GUAPAN S.A			
COMPOSICION	%	TON/DIA	TON/AÑO
CLINKER	72	1080	388800
PUZOLANA	25	375	135000
YESO	3	45	16200

Tabla 4.11. Composición (%) del cemento Portland Puzolánico Tipo IP producido en la Compañía Industrias Guapán S.A.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Se puede ver que el consumo por día de Puzolana de Latacunga es de 375 Ton y el precio de cada tonelada es 18 dólares, por tanto su uso representa una inversión de 6750 dólares americanos al día para la fábrica.

Esta teoría estipula que se podría tener un ahorro en estos costos y dependerá de encontrar el punto óptimo en las mezclas de puzolana con los materiales alternativos estudiados. Teóricamente se puede decir que el ahorro generado al introducir un material alternativo podría ser el que se describe a continuación:

% Material Alternativo.- Es el % de material alternativo que se pretende remplazar con respecto al total de la puzolana (25%) que se utiliza actualmente en la fabricación de cemento portland puzolánico IP en Industrias Guapán y puede ser como mínimo 1% y como máximo la base de este estudio, es decir el 10%.

Cantidad de Puzolana.- Se refiere a la cantidad en toneladas de puzolana que se utilizaría en el proceso de fabricación luego de remplazar cierta cantidad de ésta



por un material alternativo.

Cantidad de Alternativo.- Se refiere a la cantidad en toneladas de Material alternativo que se utilizaría en el proceso de fabricación.

Costo diario de Puzolana.- Se refiere al valor en dólares americanos que la empresa gastaría diariamente en comprar puzolana para el proceso.

Costo diario de Alternativo.- Se refiere al valor en dólares americanos que la empresa gastaría diariamente en comprar material alternativo para el proceso.

Costo por día.- Es el valor en dólares americanos que la empresa gastaría en el total de las adiciones tanto para puzolana como para alternativos.

Ahorro diario.- Si la empresa gasta (6750 dólares al día por concepto de 375 toneladas diarias a 18 dólares cada tonelada) en el proceso utilizando solamente puzolana de Latacunga; el ahorro diario nos daría la diferencia entre este valor y el valor que se pretende gastar con la adición de un material alternativo más la puzolana (costo por día).

ANÁLISIS ECONÓMICO PARA LOS POLVOS DE LA TORRE DE ROCÍO COMO MATERIAL ALTERNATIVO

Puzolana de Latacunga precio (\$18)Tonelada Cuyo costo por dia es 6750 dolares							
Analisis para Polvos de La Torre de Rocio precio (\$0.50)Tonelada							
MATERIAL ALTERNATIVO	CANTIDAD PUZOLANA	CANTIDAD ALTERNATIVO	COSTO DIARIO PUZOLANA	COSTO DIARIO MATERIAL ALTERNATIVO	COSTO POR DIA	AHORRO DIARIO	AHORRO ANUAL
%	TON/dia	TON/dia	dolares/dia	dolares/dia	dolares	dolares	dolares
1	371.3	3.8	6682.5	1.9	6684.4	65.6	23625
2	367.5	7.5	6615.0	3.8	6618.8	131.3	47250
3	363.8	11.3	6547.5	5.6	6553.1	196.9	70875
4	360.0	15.0	6480.0	7.5	6487.5	262.5	94500
5	356.3	18.8	6412.5	9.4	6421.9	328.1	118125
6	352.5	22.5	6345.0	11.3	6356.3	393.8	141750
7	348.8	26.3	6277.5	13.1	6290.6	459.4	165375
8	345.0	30.0	6210.0	15.0	6225.0	525.0	189000
9	341.3	33.8	6142.5	16.9	6159.4	590.6	212625
10	337.5	37.5	6075.0	18.8	6093.8	656.3	236250

Tabla 4.12. Análisis económico para los polvos de la Torre de Rocío como material alternativo.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

ANÁLISIS ECONÓMICO PARA CAOLÍN DE TIERRA BLANCA COMO MATERIAL ALTERNATIVO

Puzolana de Latacunga precio (\$18)Tonelada Cuyo costo por día es 6750 dolares							
Análisis Caolin Tierra Blanca precio (\$5)Tonelada							
MATERIAL ALTERNATIVO	CANTIDAD PUZOLANA	CANTIDAD ALTERNATIVO	COSTO DIARIO PUZOLANA	COSTO DIARIO MATERIAL ALTERNATIVO	COSTO POR DIA	AHORRO DIARIO	AHORRO ANUAL
%	TON/día	TON/día	dolares/día	dolares/día	dolares	dolares	dolares
1	371.3	3.8	6682.5	18.8	6701.3	48.8	17550
2	367.5	7.5	6615.0	37.5	6652.5	97.5	35100
3	363.8	11.3	6547.5	56.3	6603.8	146.3	52650
4	360.0	15.0	6480.0	75.0	6555.0	195.0	70200
5	356.3	18.8	6412.5	93.8	6506.3	243.8	87750
6	352.5	22.5	6345.0	112.5	6457.5	292.5	105300
7	348.8	26.3	6277.5	131.3	6408.8	341.3	122850
8	345.0	30.0	6210.0	150.0	6360.0	390.0	140400
9	341.3	33.8	6142.5	168.8	6311.3	438.8	157950
10	337.5	37.5	6075.0	187.5	6262.5	487.5	175500

Tabla 4.13. Análisis económico para el Caolín Tierra Blanca como material alternativo.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

ANÁLISIS ECONÓMICO PARA CHAMOTA DE LA CERAMICA ANDINA SIN ESMALTE COMO MATERIAL ALTERNATIVO

Puzolana de Latacunga precio (\$18)Tonelada Cuyo costo por dia es 6750 dolares							
Analisis Chamota Ceramica Andina precio (\$2)Tonelada							
MATERIAL ALTERNATIVO	CANTIDAD PUZOLANA	CANTIDAD ALTERNATIVO	COSTO DIARIO PUZOLANA	COSTO DIARIO MATERIAL ALTERNATIVO	COSTO POR DIA	AHORRO DIARIO	AHORRO ANUAL
%	TON/dia	TON/dia	dolares/dia	dolares/dia	dolares	dolares	dolares
1	371.3	3.8	6682.5	7.5	6690.0	60.0	21600
2	367.5	7.5	6615.0	15.0	6630.0	120.0	43200
3	363.8	11.3	6547.5	22.5	6570.0	180.0	64800
4	360.0	15.0	6480.0	30.0	6510.0	240.0	86400
5	356.3	18.8	6412.5	37.5	6450.0	300.0	108000
6	352.5	22.5	6345.0	45.0	6390.0	360.0	129600
7	348.8	26.3	6277.5	52.5	6330.0	420.0	151200
8	345.0	30.0	6210.0	60.0	6270.0	480.0	172800
9	341.3	33.8	6142.5	67.5	6210.0	540.0	194400
10	337.5	37.5	6075.0	75.0	6150.0	600.0	216000

Tabla 4.14. Análisis económico para la Chamota Cerámica Andina sin esmalte como material alternativo.

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

Con este estudio se ha demostrado que la propuesta más optimista la cual consistía en remplazar el 10% de la puzolana con material alternativo no dio los resultados de calidad que estén dentro de la Norma de calidad pero se debe continuar con el estudio ya que hasta la proyección pesimista que es remplazar tan solo uno por ciento con cualquier material, muestra un ahorro significativo en los gastos de compra al cabo de un año como se puede ver en las tablas anteriores.

4.3. Análisis de resultados y factibilidad del estudio

A continuación se analiza el uso de los materiales que mejor resultado presentaron durante la experimentación, así como ventajas y desventajas que se

podrían presentar al utilizar los materiales en el proceso.

Puzolana de Challuabamba

El inconveniente más relevante que presenta este material, se encuentra en las desviaciones que presentan algunas propiedades de la puzolana respecto a las normas; en especial referente al contenido de humedad que posee. Adicionar un secador para puzolanas en el proceso de fabricación de cemento, ayudará a disminuir la humedad y por lo tanto mejorar la granumoletría del material pudiéndose considerar como adecuado para el uso.

Chamota Cerámica Andina sin Esmalte

Este material ha presentado un comportamiento bastante interesante debido a que el costo de extracción, transporte y producción es bajo debido a que la empresa cerámica lo tiene como material de desperdicio. De ahí que el costo infiere nada más que en la transportación del material hasta la fábrica (26km). Adicional a esta ventaja se encuentra la reducción de tamaño y el secado - activación que ya posee el material.

El problema se presenta con la resistencia a la compresión a los 28 días donde muestra una resistencia hasta 24 MPa una unidad por debajo de la norma lo cual representa una amenaza en la calidad del cemento terminado. De ahí la importancia de un nuevo estudio reduciendo los porcentajes de uso de cada material alternativo en el proceso.

Polvos de la Torre de Rocío

Al igual que el anterior se presenta favorable debido a que esta materia es generada por el proceso de fabricación (molienda) de Industrias Guapán S.A por lo cual los gastos solo inferirían en transporte y no necesita disminución de tamaño, propiedades como humedad, retenido, actividad se encuentran dentro de la Norma y en cuanto a la resistencia a la compresión presenta un valor de 24MPa

una unidad por debajo de la Norma.

Caolín Tierra Blanca

Por su distancia y precio resulta atractivo para la industria, presenta gran humedad lo cual podría generar un costo adicional en eliminación de agua, la densidad se encuentra en $2.38 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ por debajo del $2.50 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ señalado en el capítulo 1 para la utilización de áridos.

Con respecto a la resistencia y actividad puzolánica se encuentran por debajo de la norma pero lo interesante de este material es que al mezclarlo con puzolana de Latacunga a demostrado subir su actividad de (70 a 74) % y también su resistencia de (22 a 24)MPa.

A continuación revisaremos las mezclas que resultaron más favorables dentro de la experimentación.

Tierra Blanca – puzolana de Latacunga

Esta mezcla posee una actividad puzolánica de 74% por el método del cemento y con respecto a la resistencia a la compresión nos da un valor de 24MPa, estos valores están muy cercanos a la norma por lo que se puede llegar a pensar que en otra dosificación se podría tener valores dentro de los límites de tolerancia establecidos en la Norma de calidad.

Polvos de la Torre de Rocío – puzolana de Latacunga

Con esta mezcla se aprecia una disminución en la actividad y la resistencia con valores de 73% para actividad puzolánica y 24MPa de resistencia a la compresión por lo que también se presume que se podrían tener valores dentro de la Norma disminuyendo la dosificación.



V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

La actual tecnología cementera ofrece la posibilidad de manipular una serie de materiales áridos - minerales que hasta hace pocos años tenían nula o poca aplicación en el proceso de fabricación del cemento, ya sea por su dificultad de extracción o por que no existía la posibilidad de conocer al detalle su composición química y ordenamiento cristalográfico. Con el uso de nuevos métodos e instrumentos analíticos se abren muchas puertas para la aplicación de materiales alternativos como sustitutos de los materiales tradicionales usados en la elaboración del cemento; materiales varios que van desde calizas, arcillas, escorias de procesos industriales y un sin número de materiales más que actualmente se encuentran en estudio gracias a la facilidad, exactitud y rapidez del análisis instrumental, sin dejar de lado los métodos tradicionales que a pesar de ser arduos, nunca dejarán de ser los más confiables.

Gracias a la aplicación de métodos de análisis instrumental; Difractometría de rayos X, Fluorescencia de rayos X, combinados con los métodos tradicionales del cemento se han dado las guías para establecer de forma experimental, cuáles son los materiales alternativos presentes en la región, que presentan mejores características para su uso en la fabricación de cemento Portland Puzolánico Tipo IP, concluyendo como óptimos dentro de este estudio los siguientes:

- Polvos de la Torre de Rocío.
- Caolín de Tierra Blanca.
- Chamota de Cerámica Andina sin Esmalte.

Así mismo se determinaron las mezclas o combinaciones potencialmente óptimas a ser utilizadas como material sustituto de la puzolana de Latacunga, actualmente utilizada en la fabricación de cemento en la Compañía Industrias

Guapán, encontrándose como válidas las siguientes composiciones:

- Puzolana de Latacunga - Polvos de la Torre de Rocío.
- Puzolana de Latacunga - Caolín de Tierra Blanca.

A más de las anteriormente mencionadas, es prudente también incluir en este estudio, debido a las características bastantes aceptables que muestra para cada determinación la mezcla:

- Puzolana de Latacunga - Chamota Cerámica Andina Sin Esmalte.

La dosificación del 10% de material alternativo a remplazar en lugar de puzolana de Latacunga no da resultados altamente satisfactorios para ningún material, pero se llega a la conclusión de que una dosificación menor al 10% dará resultados óptimos ya que los valores obtenidos con el 10% de material en mezcla, están cerca a los establecidos en las normas técnicas INEN. De la misma forma esta teoría no debe ser rechazada ni aceptada sin ser sometida a un proceso de experimentación previo.

Para todos los materiales se ha podido establecer que la temperatura máxima y óptima de activación es de 600°C, ya que una temperatura superior no afecta en mayor medida a la actividad puzolánica del árido, existiendo claro está, ciertas excepciones. Por otro lado, al parecer, la disminución de tamaño sí afecta en gran medida la actividad puzolánica debido al reordenamiento laminar de la estructura cristalina de los minerales.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio experimental con los áridos que han presentado características favorables para su utilización como materiales alternativos. En este estudio se deberán utilizar las tres mezclas anteriormente señaladas y variar la dosificación de los materiales alternativos desde 1 al 10 por ciento con respecto al porcentaje de puzolana utilizado en la fabricación de



cemento para Compañía Industrias Guapán S.A.

Se debe también tener en cuenta el exceso de humedad que presenta el Caolín de Tierra Blanca, ya que podría ocasionar problemas en el secado y activación una vez llevado a cabo el proceso de producción y para estudio posteriores.

Se deberá combinar, para cada estudio, los métodos tradicionales de determinación de las propiedades físico – químicas del cemento y sus componentes con los métodos de análisis instrumental para asegurar la correcta determinación y validez de cada ensayo realizado.



VI. BIBLIOGRAFÍA.

- <http://www.industriasguapan.com.ec/contenido.aspx?IdTexto=1&Tipo=3#> (18-04-2012; 10:45)
- http://www.inecyc.org.ec/paginas/historia_cemento.html (22-04-2012, 15:48)
- Norma Técnica Ecuatoriana INEN 151:2010, Tercera Revisión, 2010 – 01. (30/04/2012,12:04)
- http://www.lafarge.com.ec/wps/portal/ec/2_2_1-Manufacturing_process (30-04-2012, 13:05)
- <http://www.quiminet.com/articulos/que-son-las-arcillas-10078.htm> (16-05-2012, 22:10)
- <http://www.quiminet.com/articulos/las-arenas-puzolanas-naturales-33026.htm> (10-06-2012, 12:30).
- http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732010000300001 (28-07-2012, 11:39).
- <http://www.ecoingenieria.org/docs/Puzolanas.pdf>

VII. ANEXOS

Anexo 1.

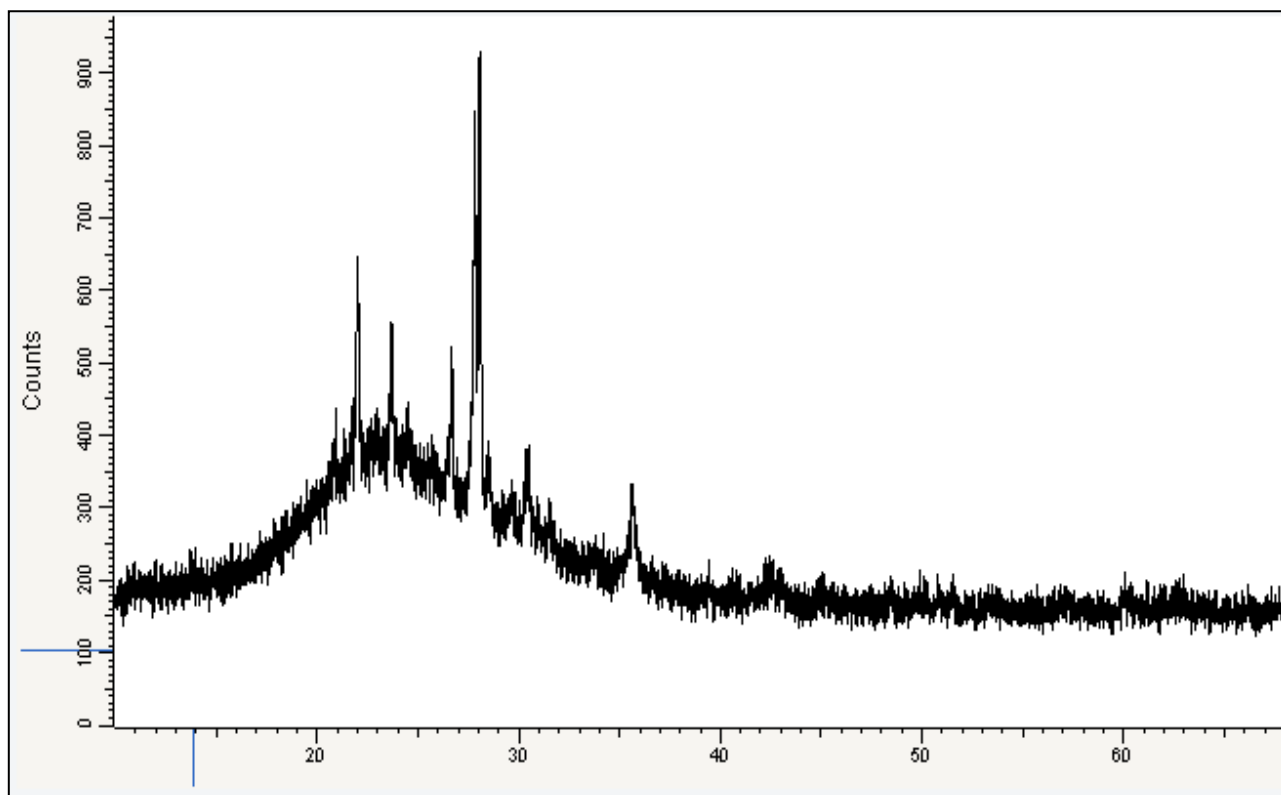


Grafico A.1. Difractograma de Pozolana Latacunga sin activación (20°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

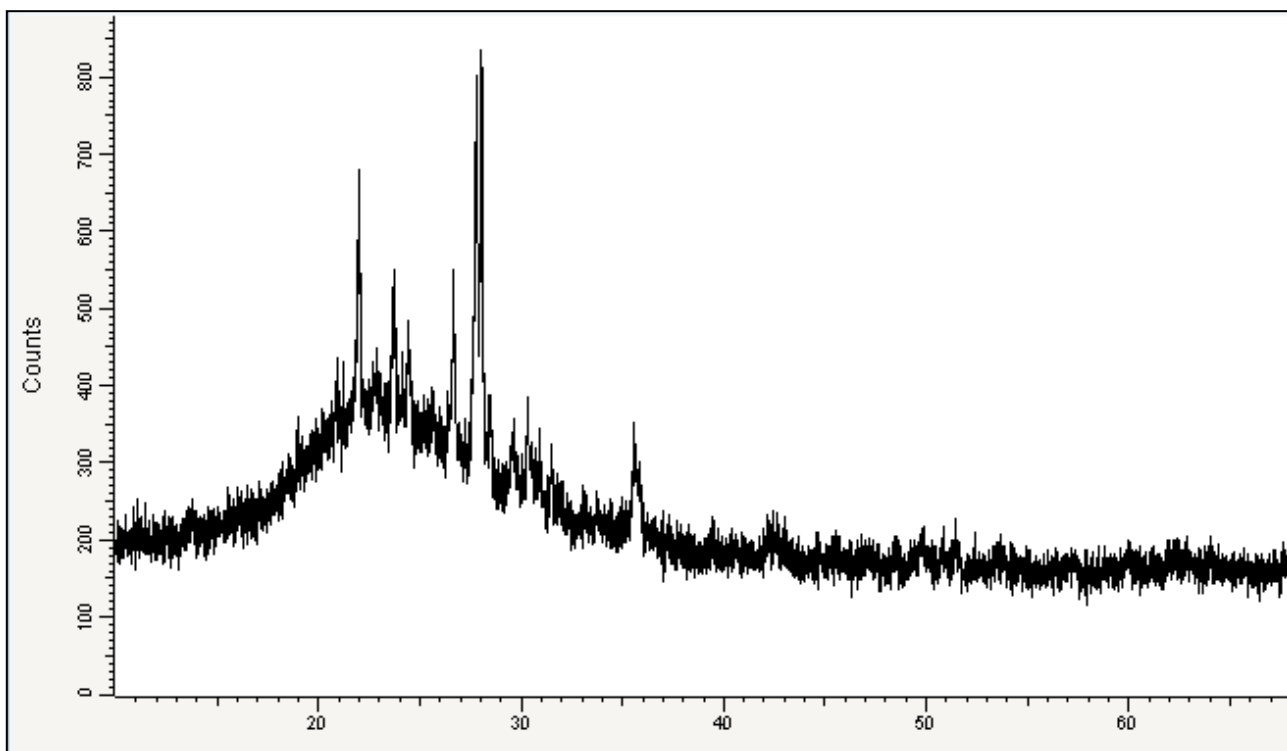


Grafico A.2. Difractograma de Pozzolana Latacunga activada (400°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

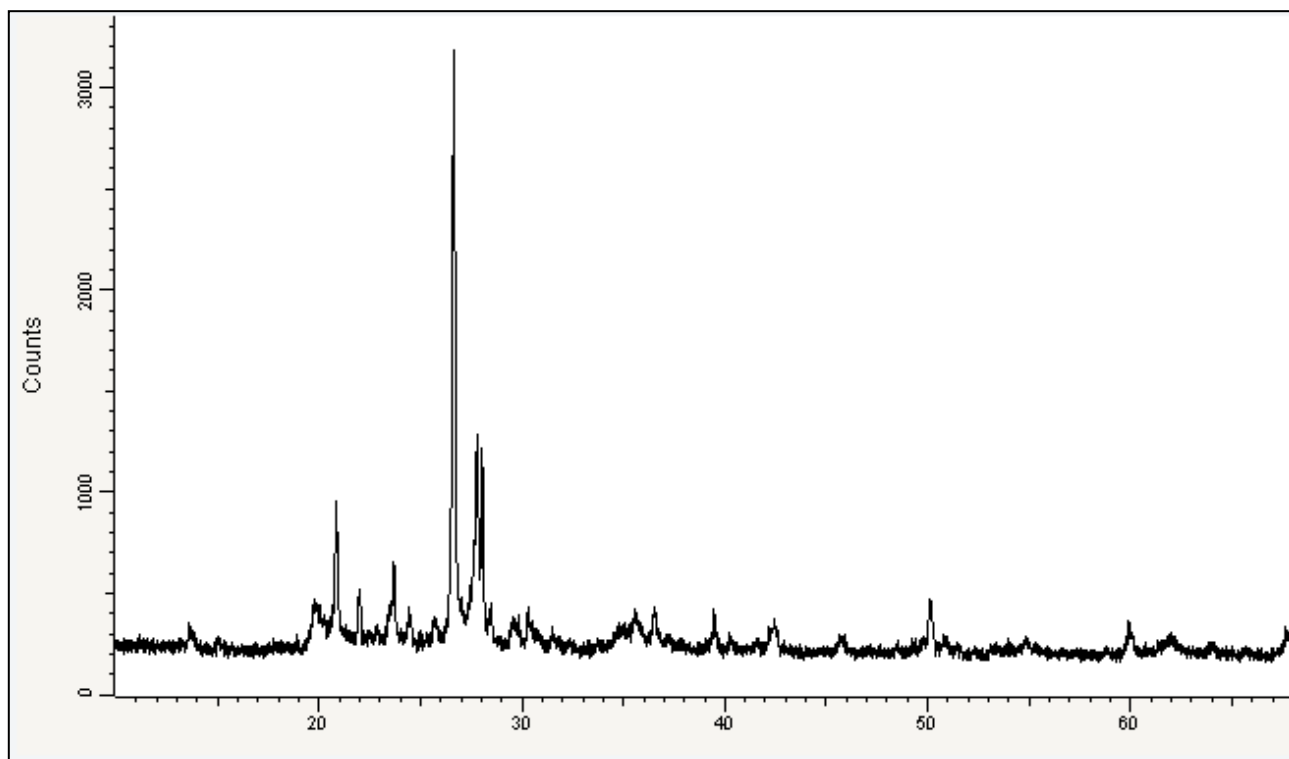


Grafico A.3. Difractograma de Arcilla Guapán activada (400°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

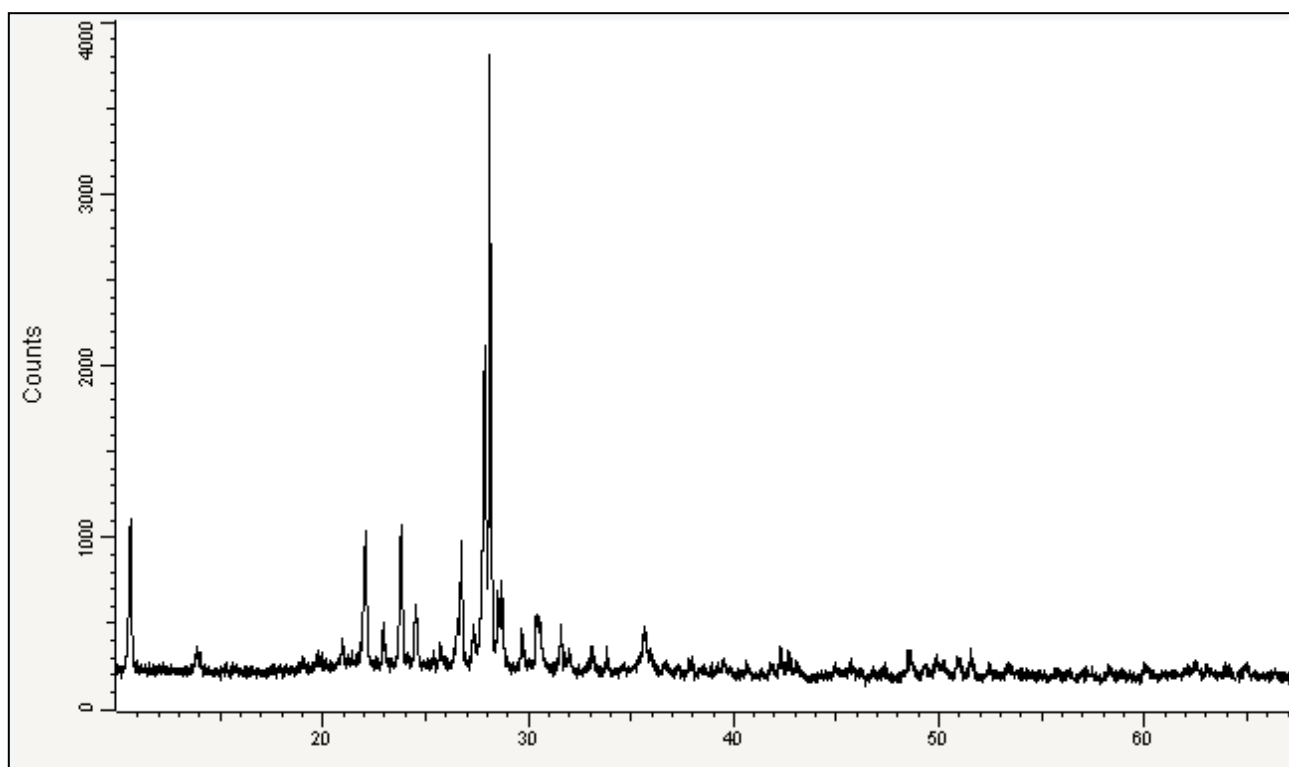


Grafico A.4. Difractograma de Pozolana Challuabamba sin activación (20°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

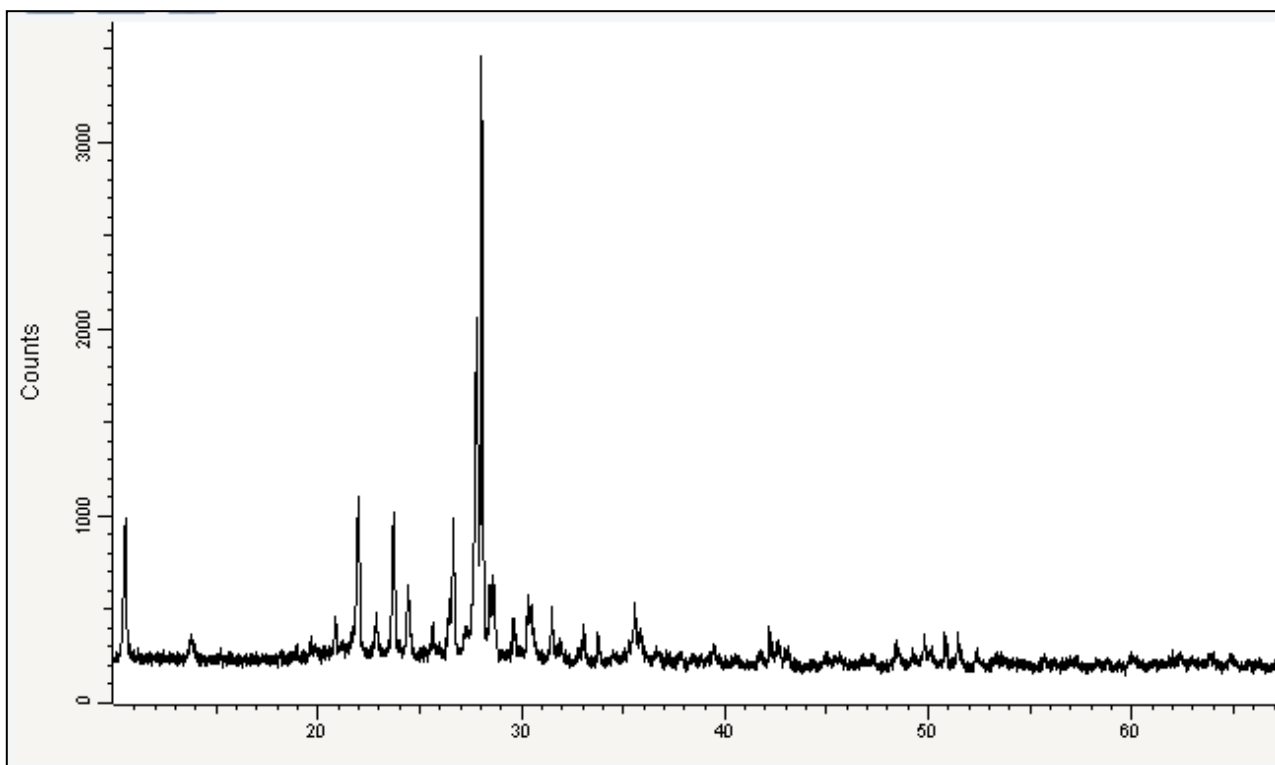


Grafico A.5. Difractograma de Pozzolana Challuabamba activada (400°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

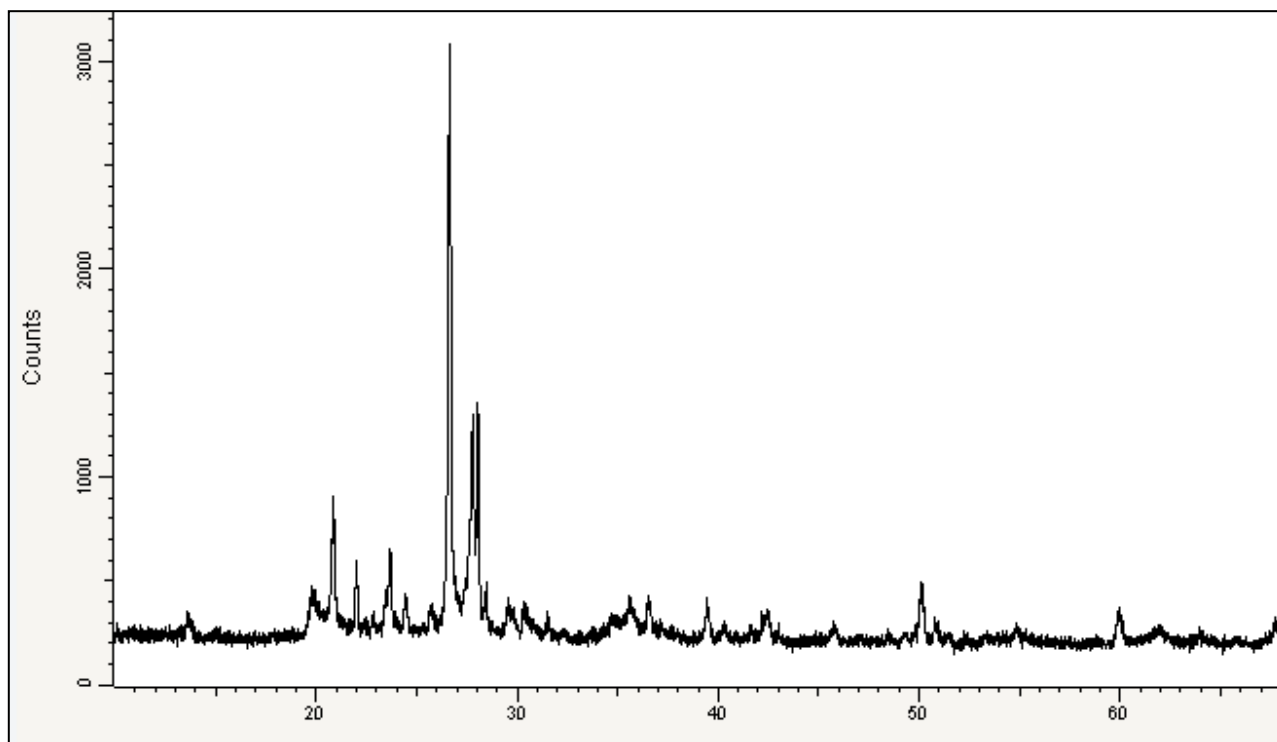


Grafico A.6. Difractograma de Arcilla Guapán sin activación (20°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

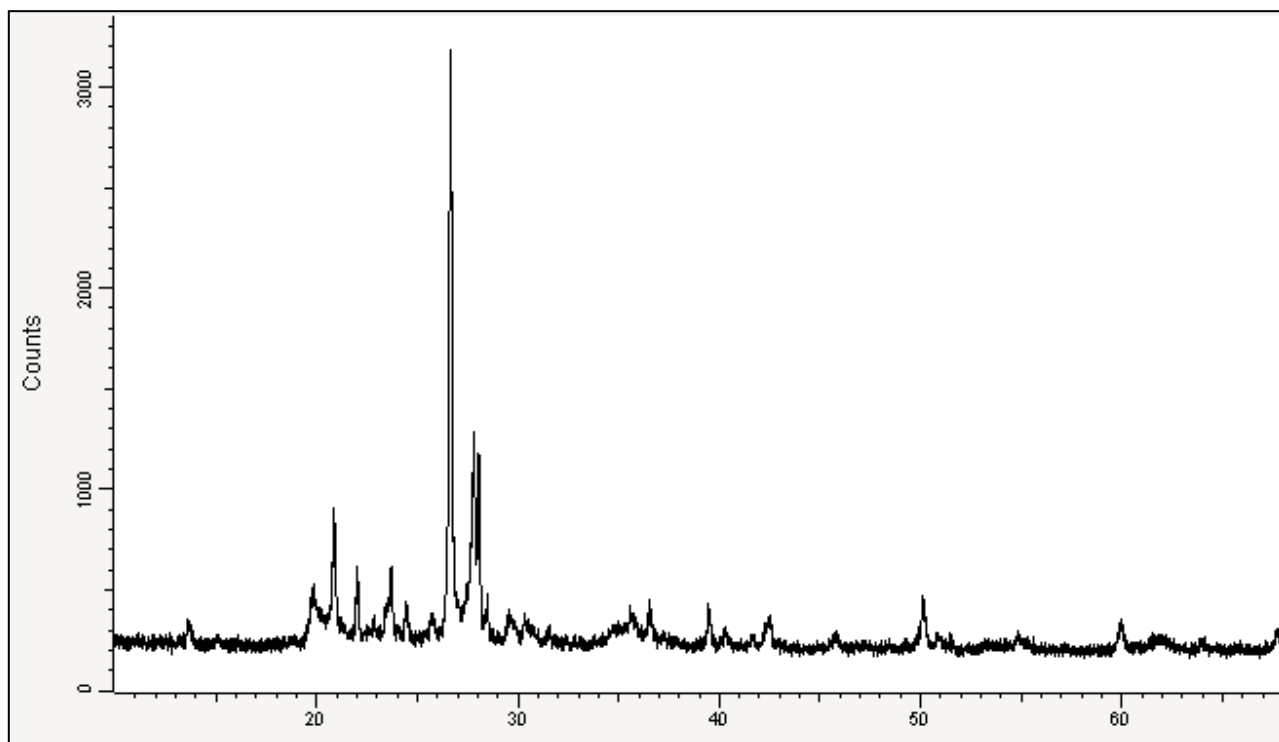


Grafico A.7. Difractograma de Arcilla Guapán activada (500°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

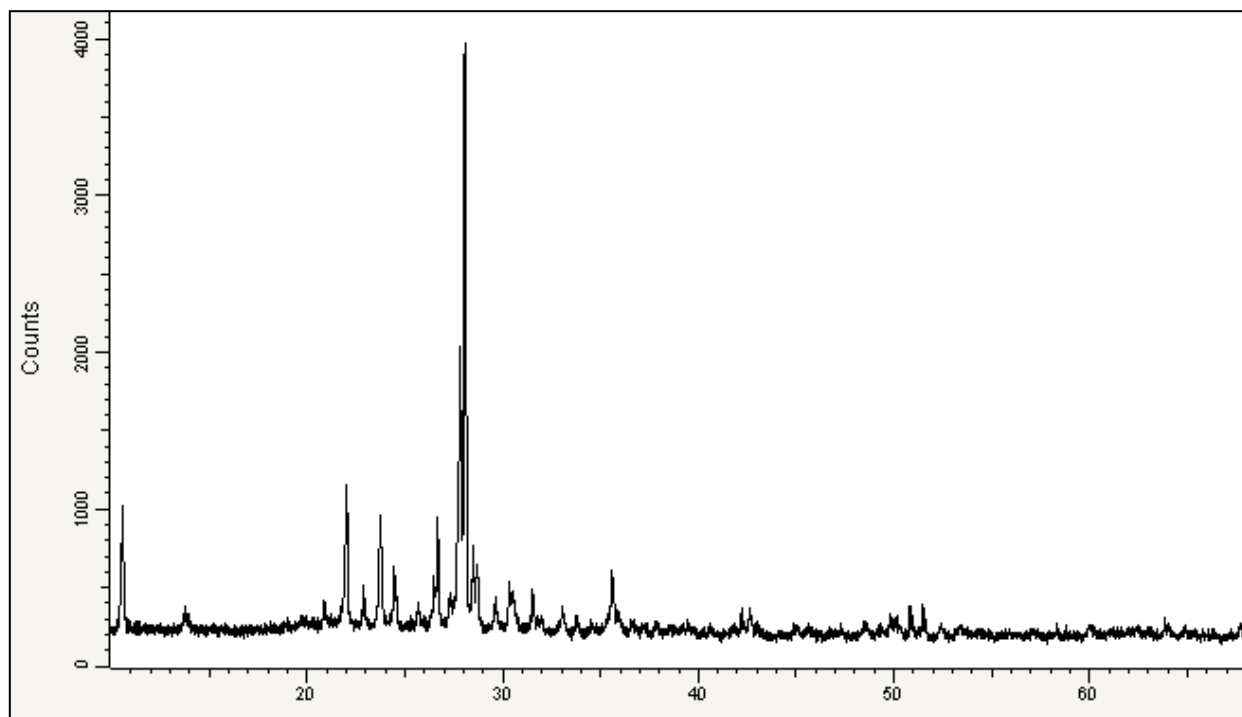


Grafico A.8. Difractograma de Pozzolana Challuabamba activada (500°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

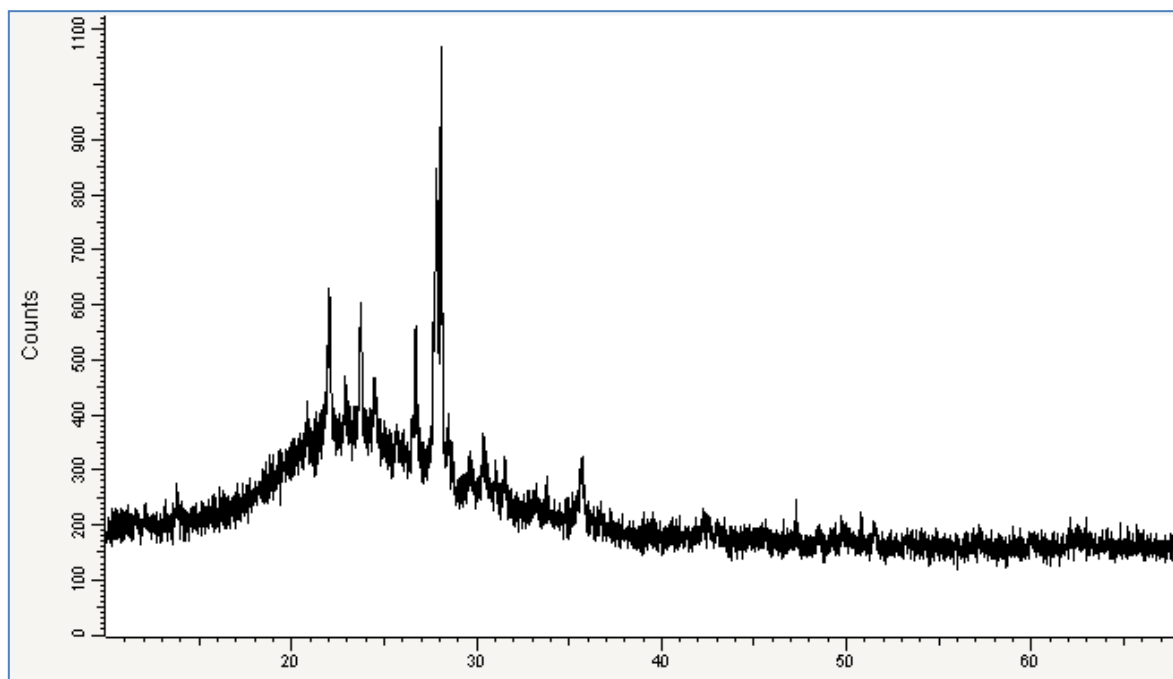


Grafico A.9. Difractograma de Pozzolana Latacunga activada (600°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

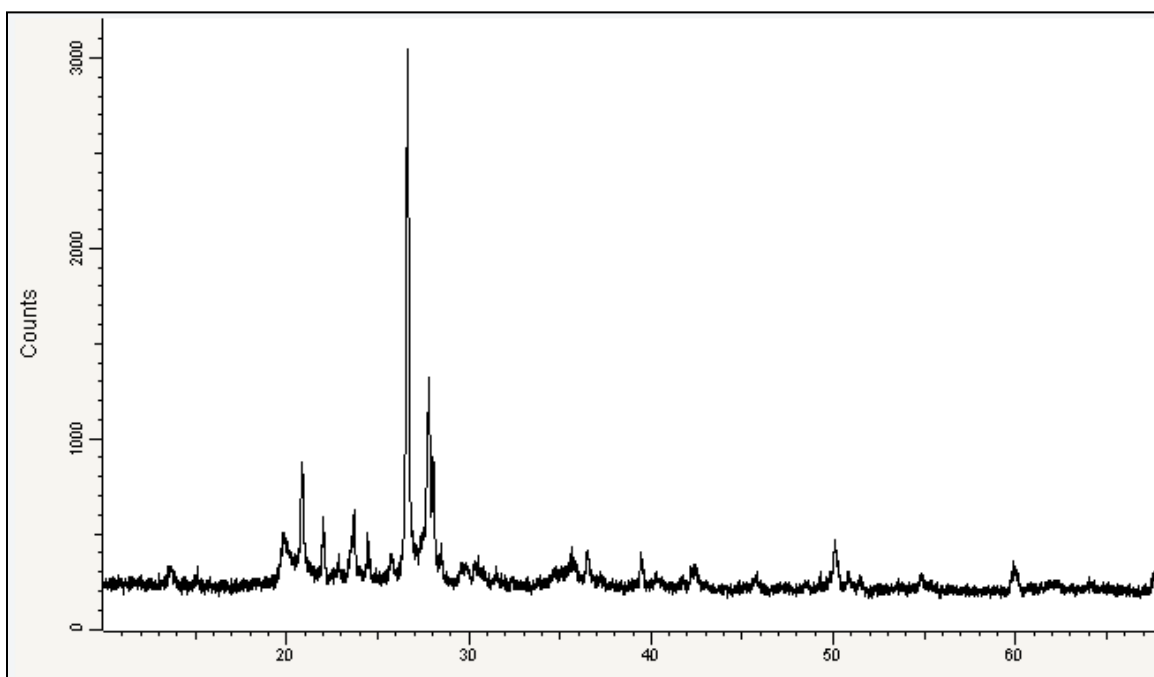


Grafico A.10. Difractograma de Arcilla Guapán activada (600°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

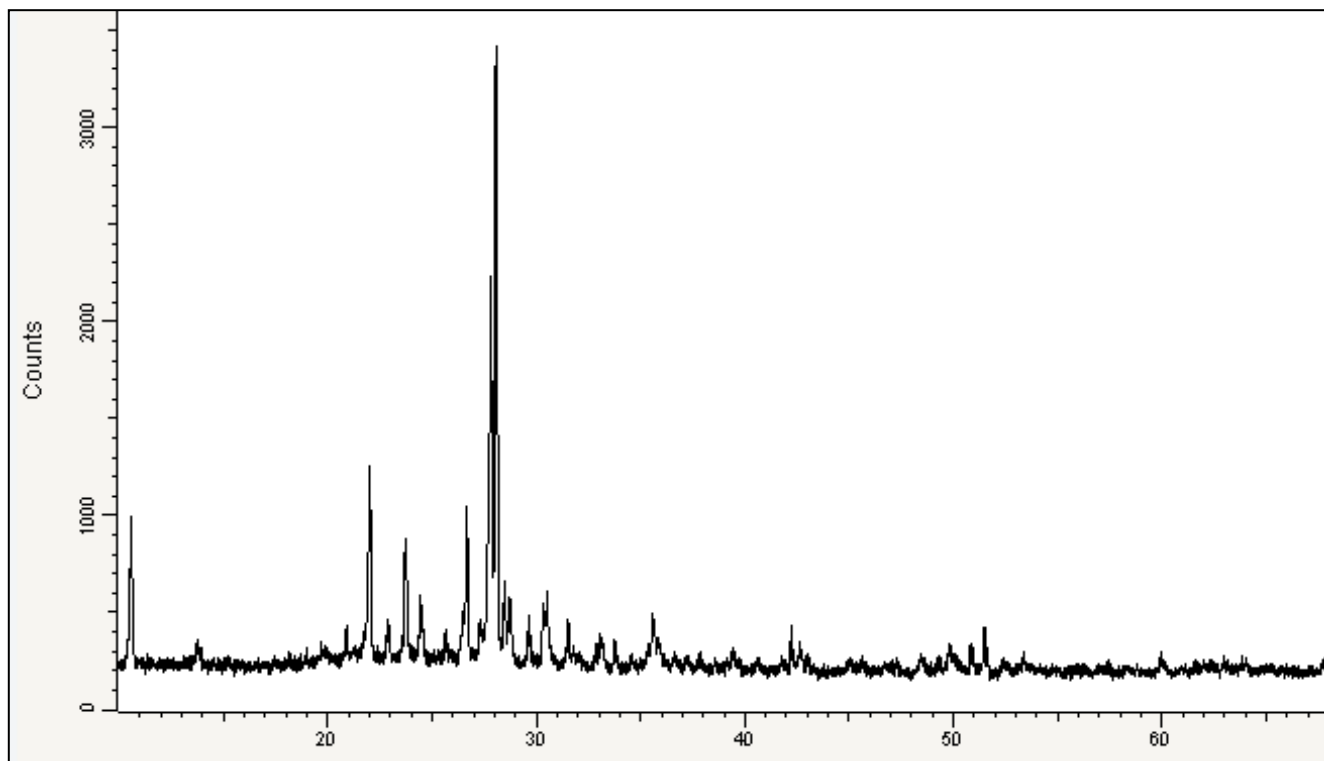


Grafico A.11. Difractograma de Puzolana Challuabamba activada (600°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

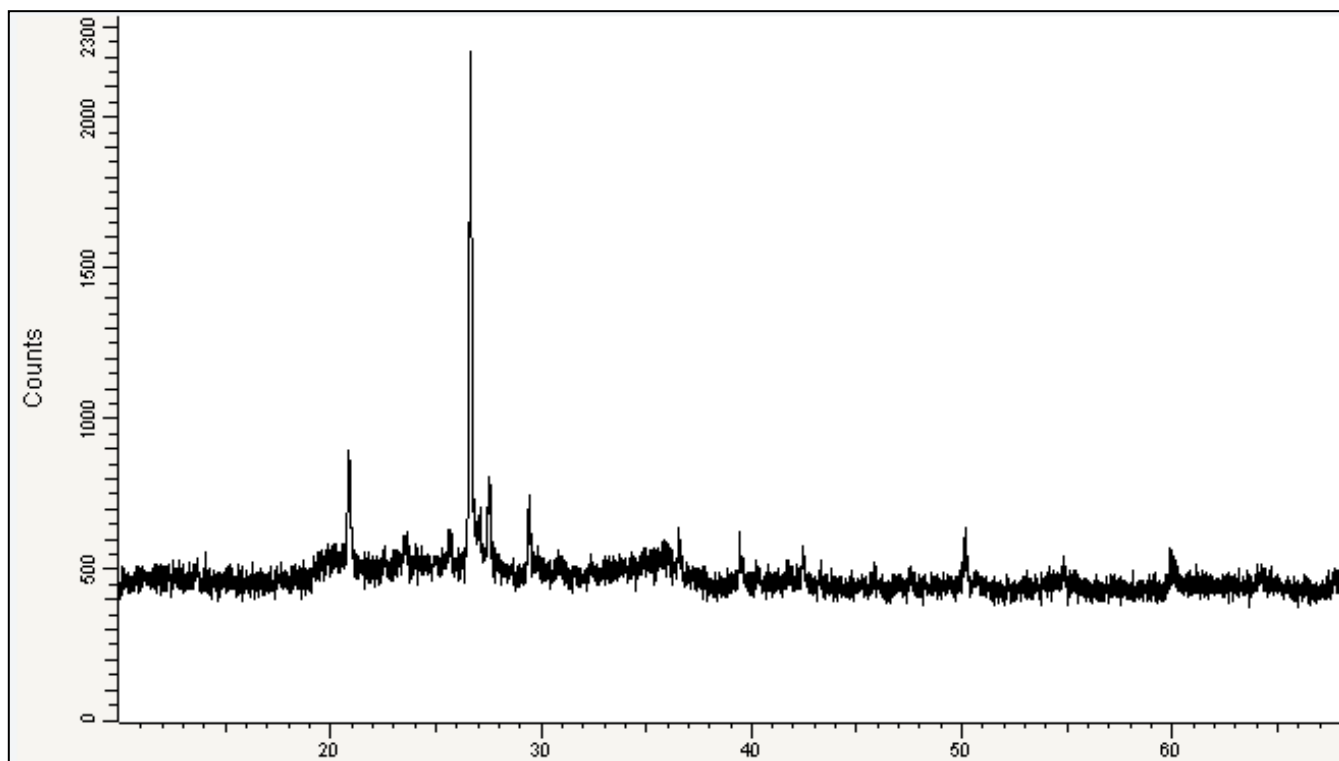


Grafico A.12. Difractograma de Arcilla Taday activada (600°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

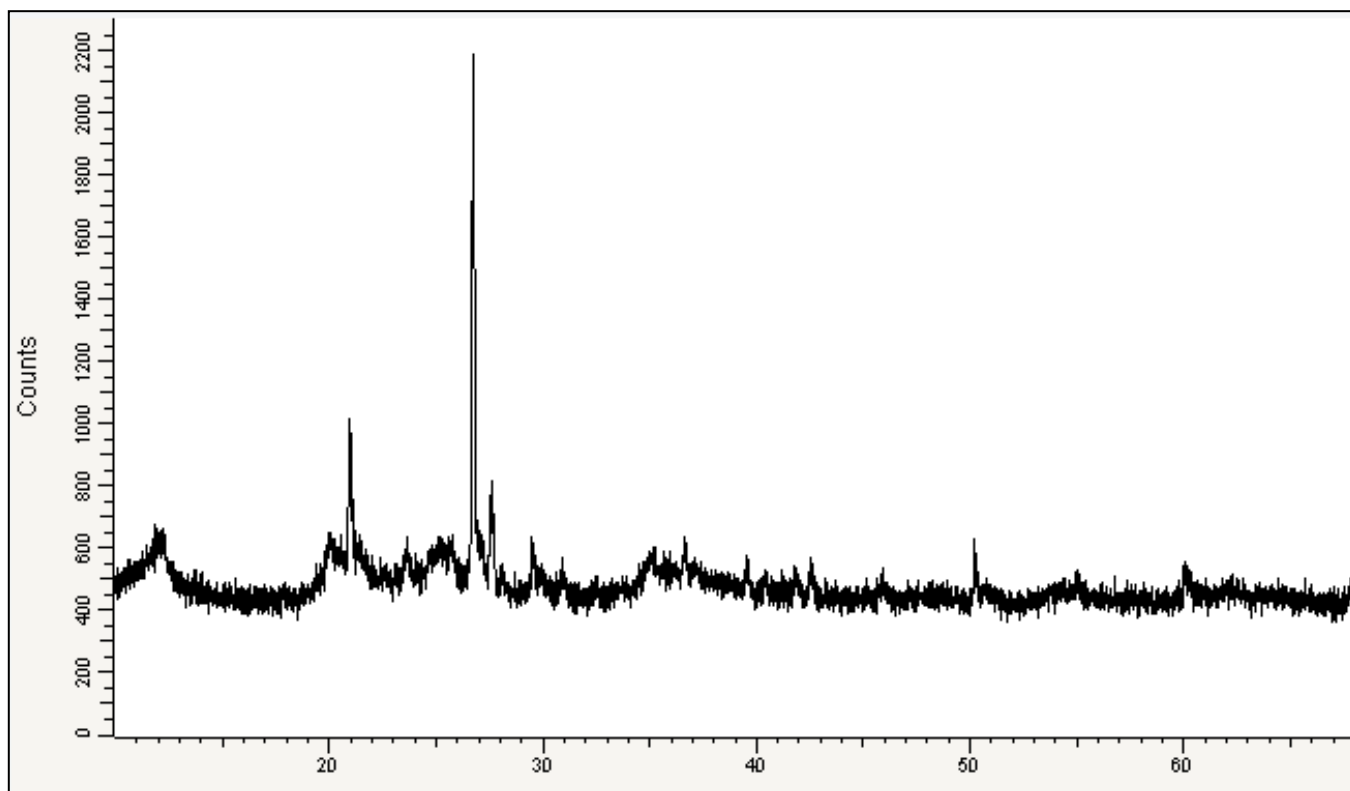


Grafico A.13. Difractograma de Arcilla Taday sin activación (20°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

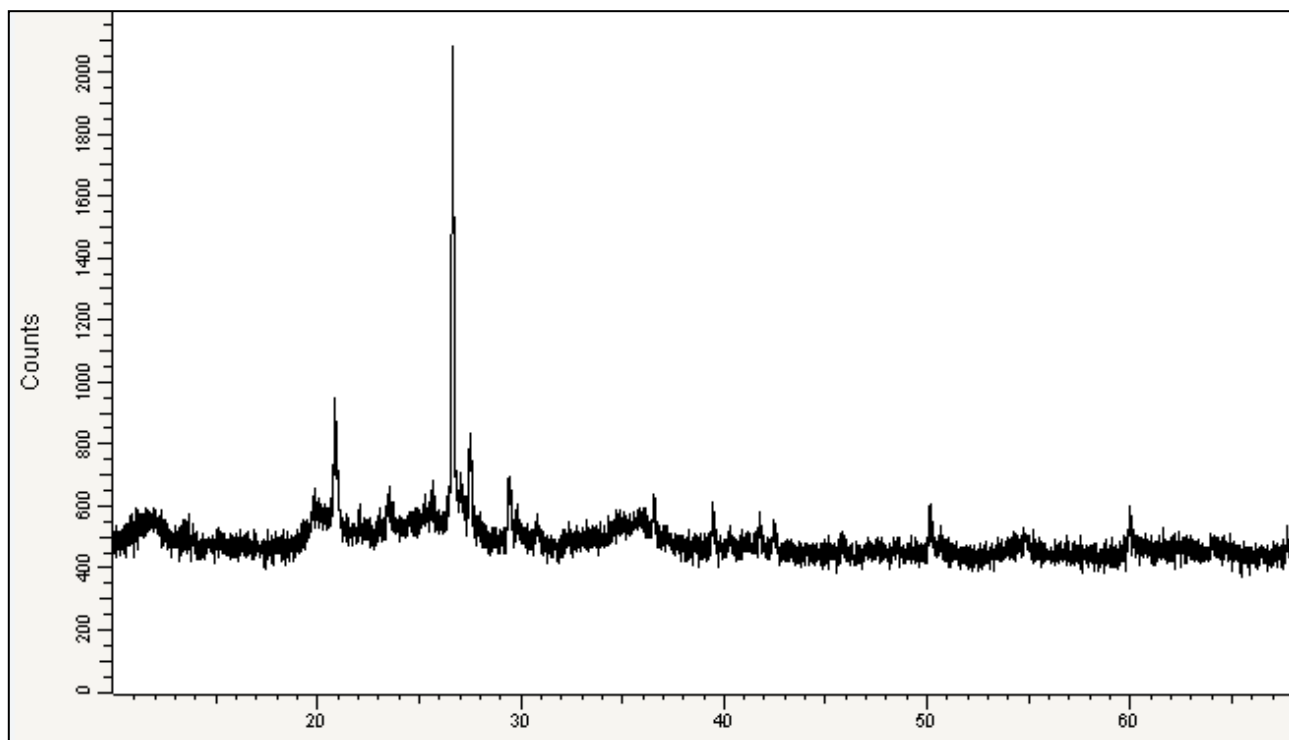


Grafico A.14. Difractograma de Arcilla Taday activada (500°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

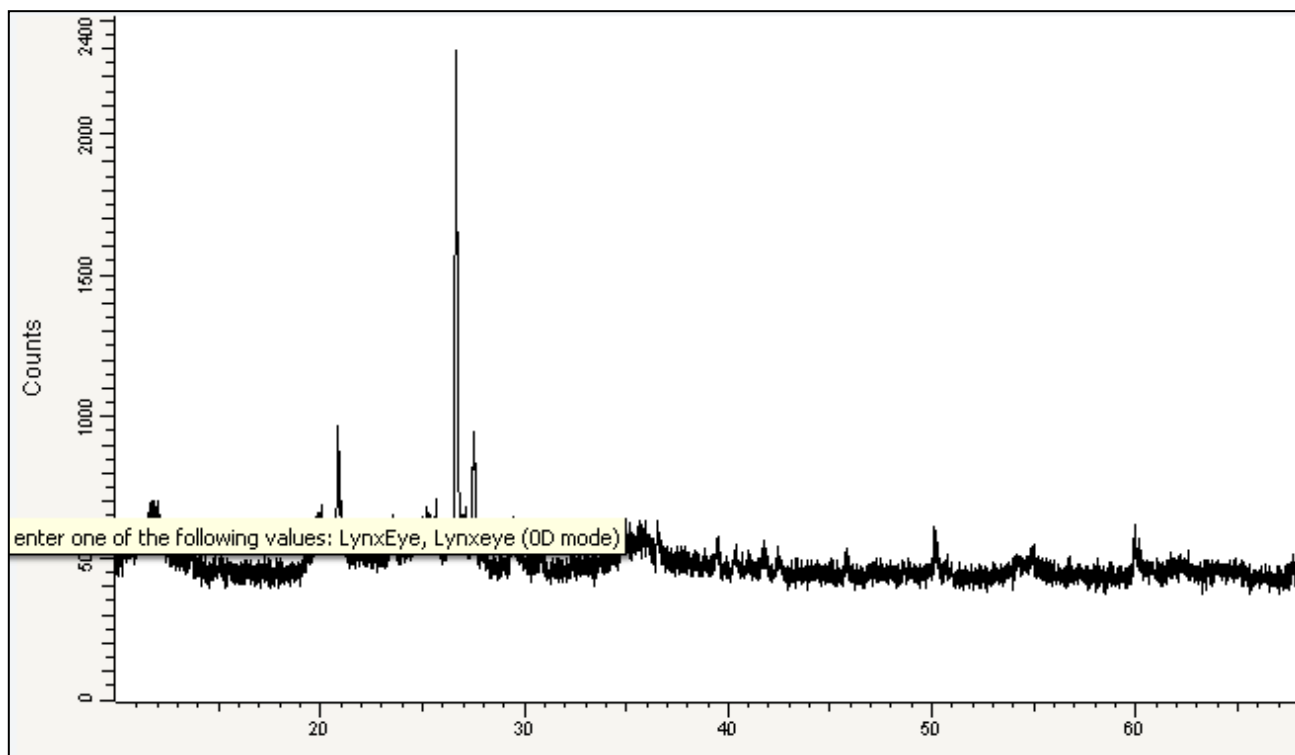


Grafico A.15. Difractograma de Arcilla Taday activada (400°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

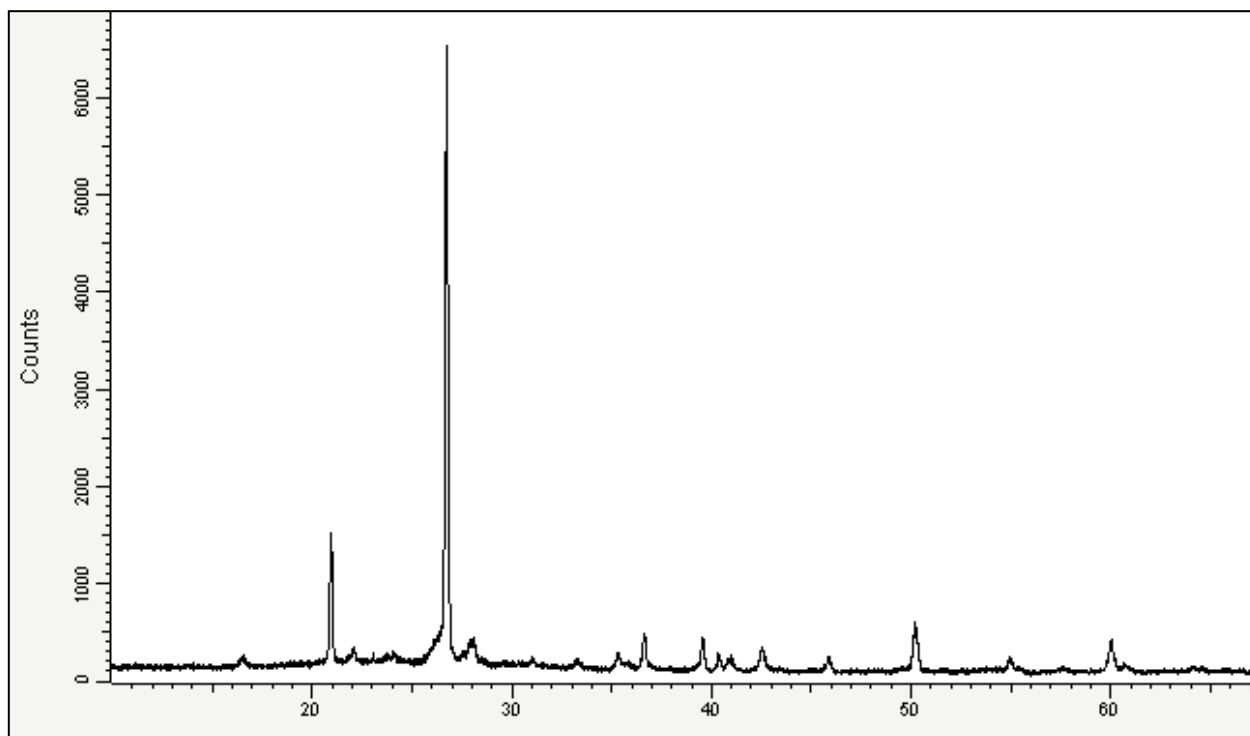


Gráfico A.16. Difractograma de Chamota Cerámica Andina sin Esmalte, sin activación (20°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

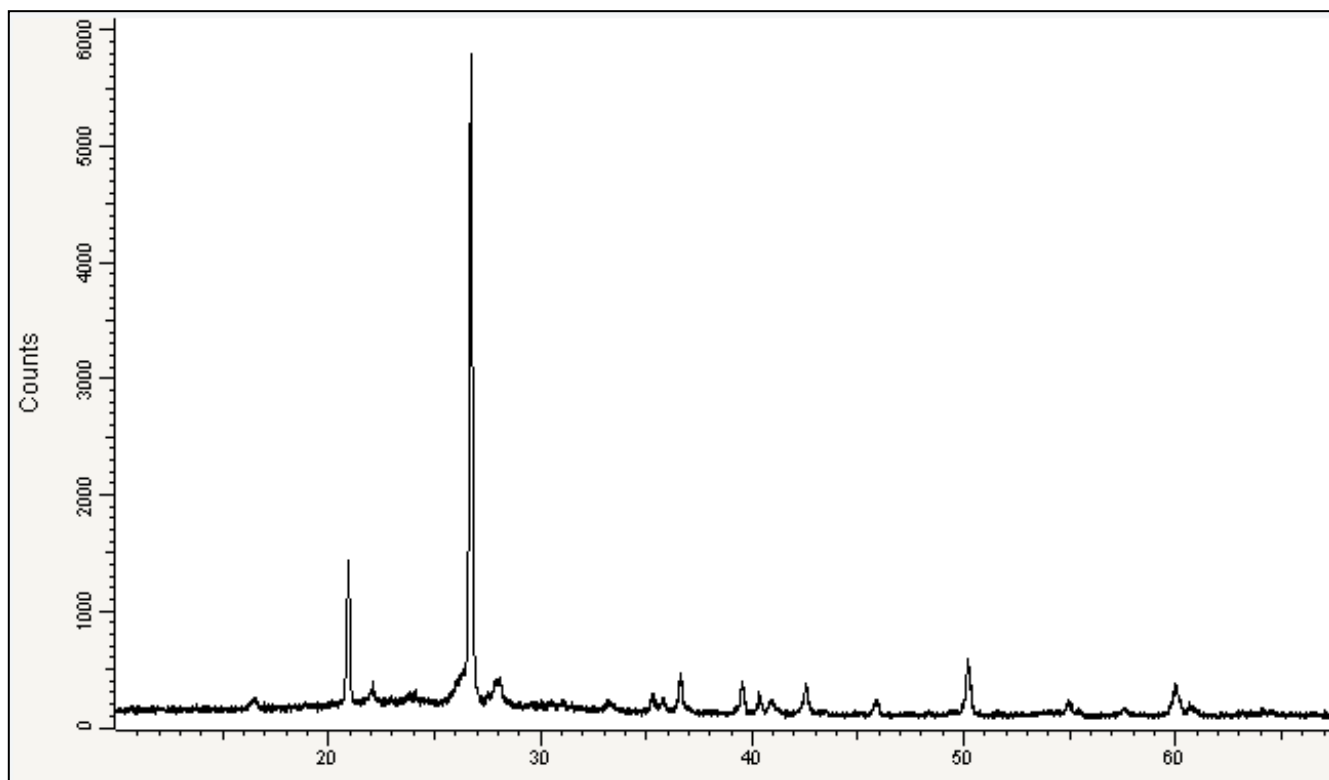


Grafico A.17. Difractograma de Chamota Cerámica Andina con Esmalte, sin activación (20°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

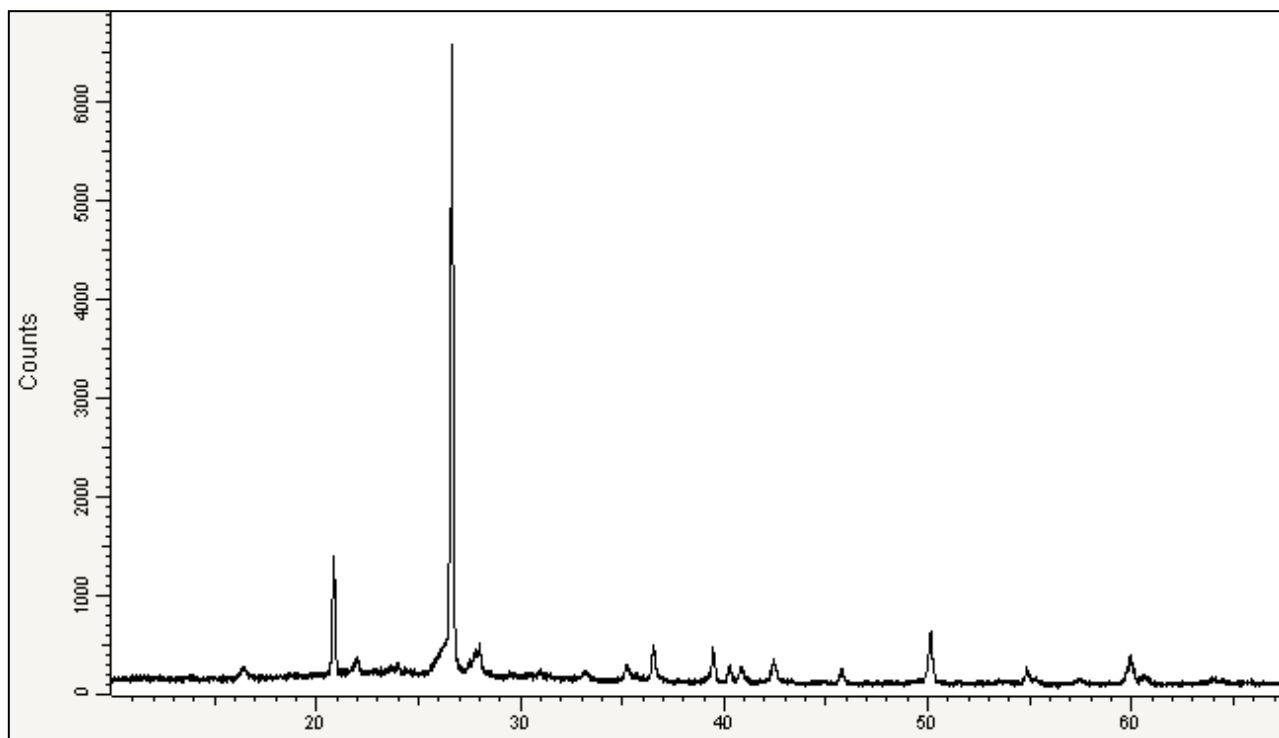


Grafico A.18. Difractograma de Chamota Cerámica Andina sin Esmalte, activada (400°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

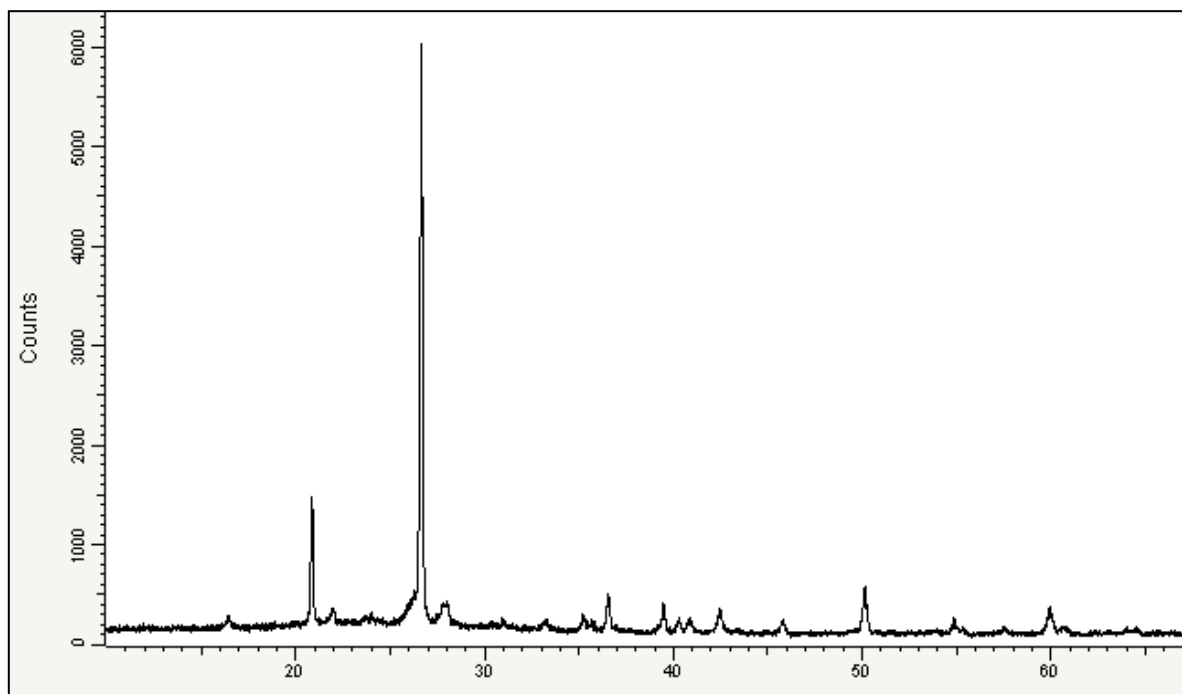


Grafico A.19. Difractograma de Chamota Cerámica Andina con Esmalte, activada (400°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

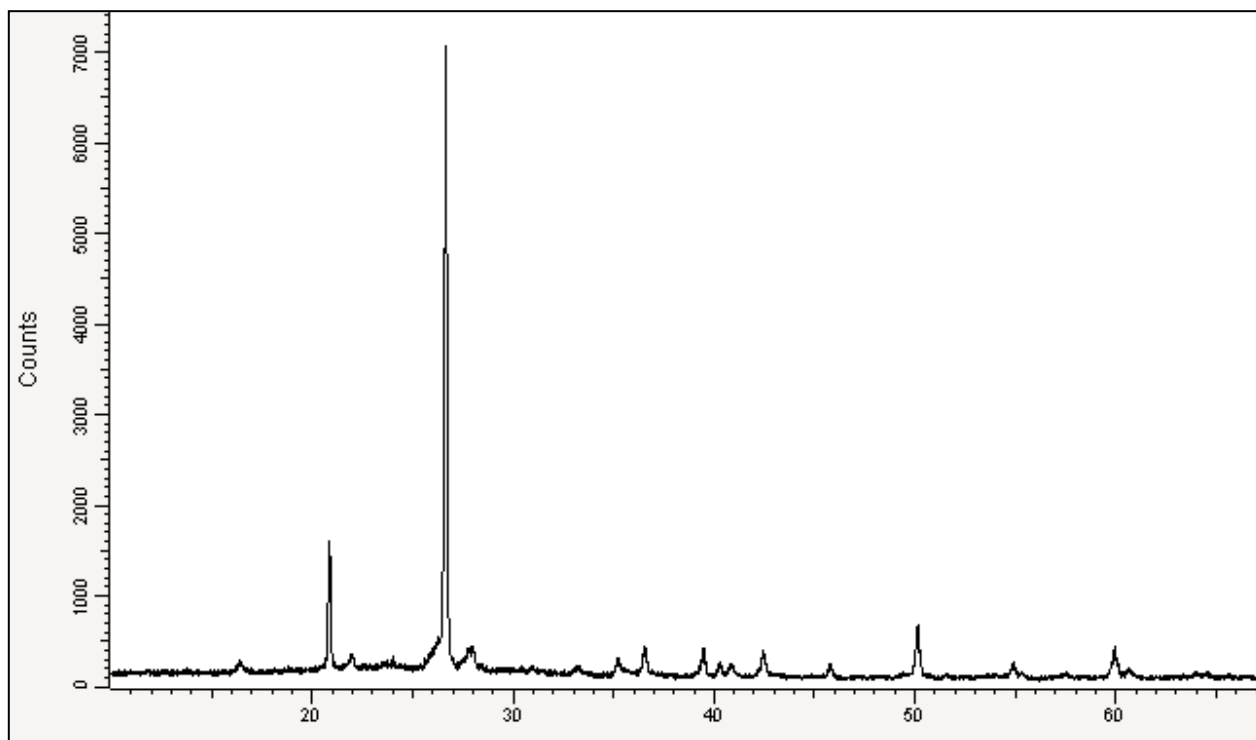


Grafico A.20. Difractograma de Chamota Cerámica Andina sin Esmalte, activada (500°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

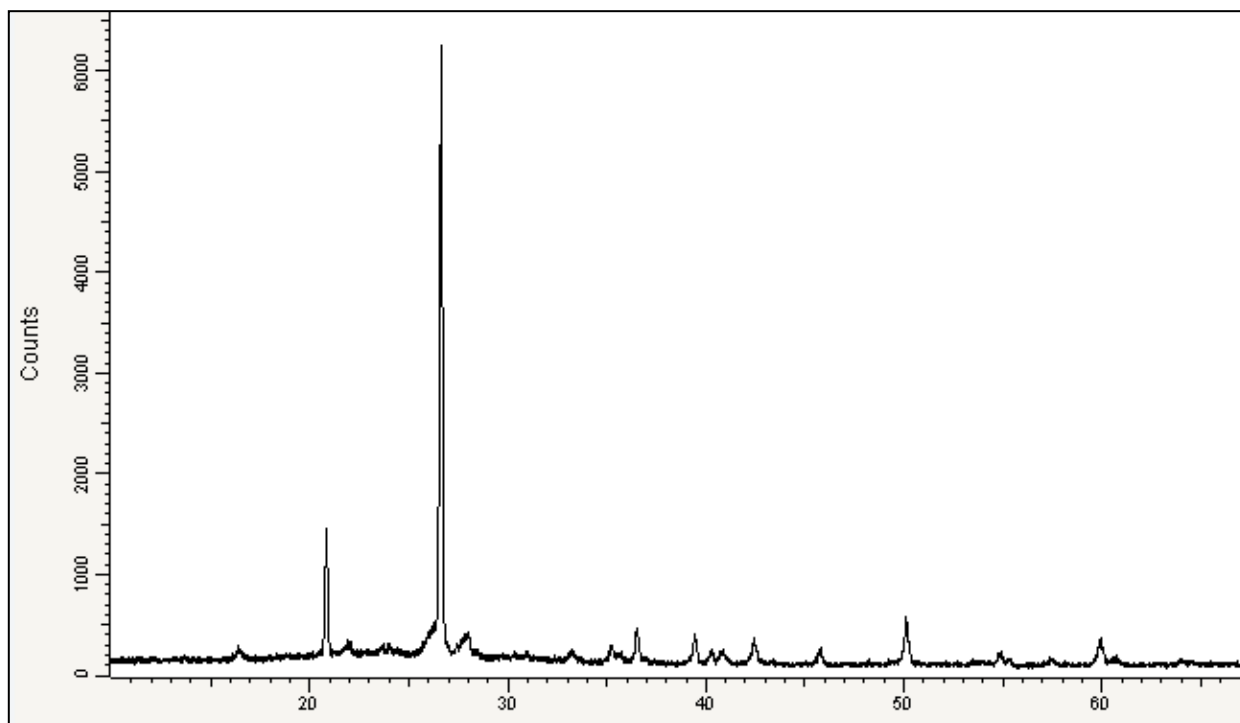


Grafico A.21. Difractograma de Chamota Cerámica Andina con Esmalte, activada (500°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

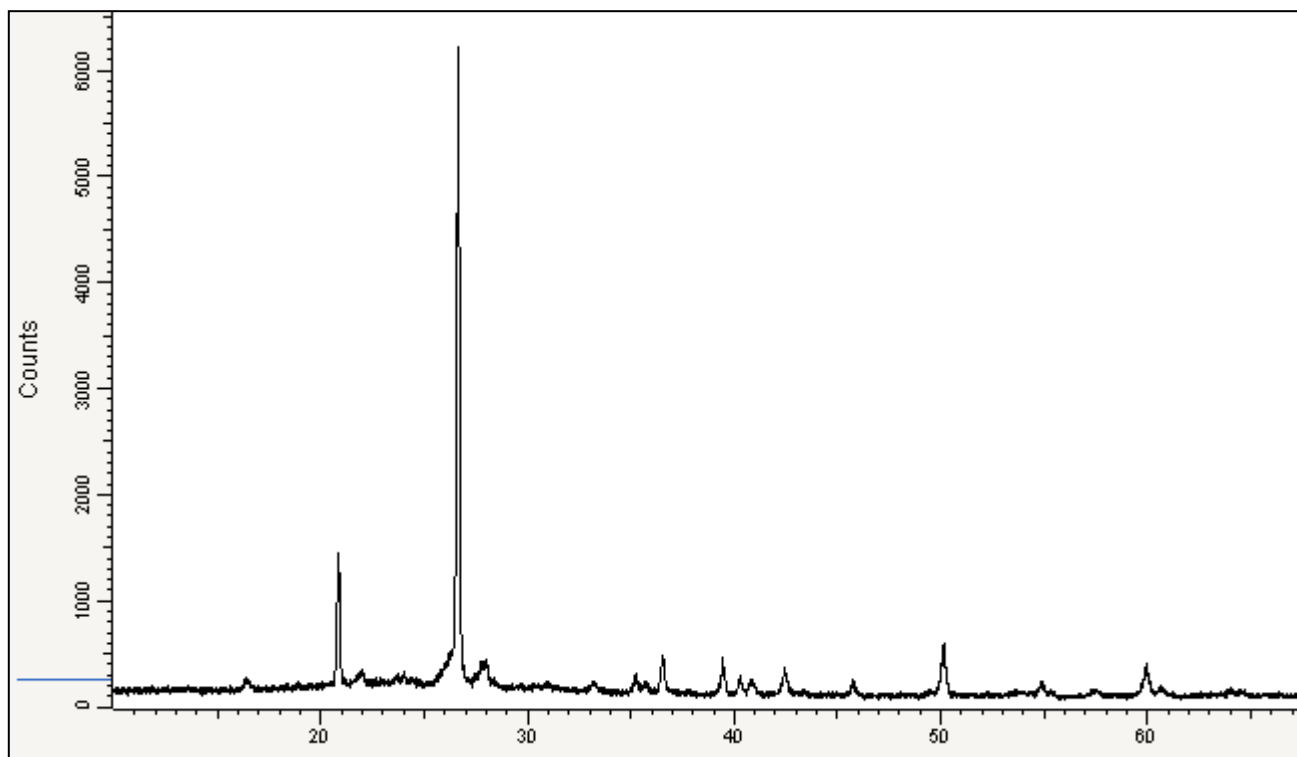


Grafico A.22. Difractograma de Chamota Cerámica Andina con Esmalte, activada (600°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

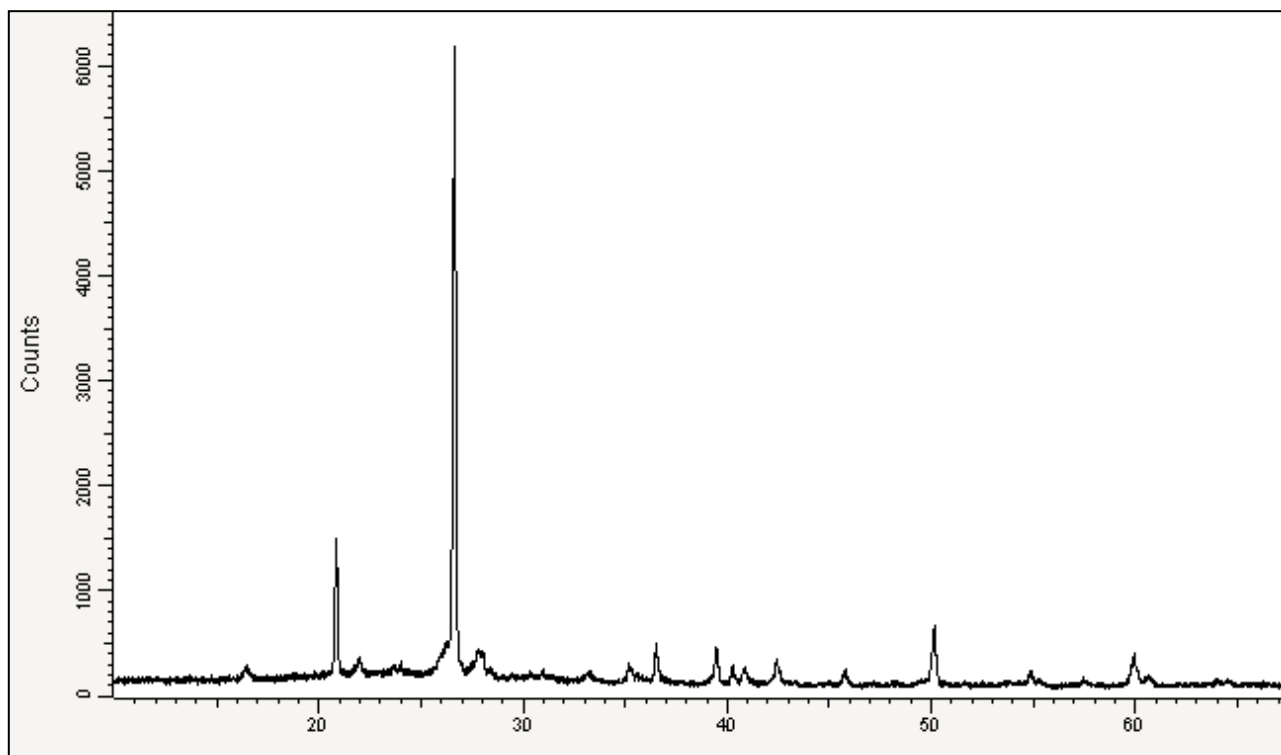


Grafico A.16. Difractograma de Chamota Cerámica Andina sin Esmalte, activada (600°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

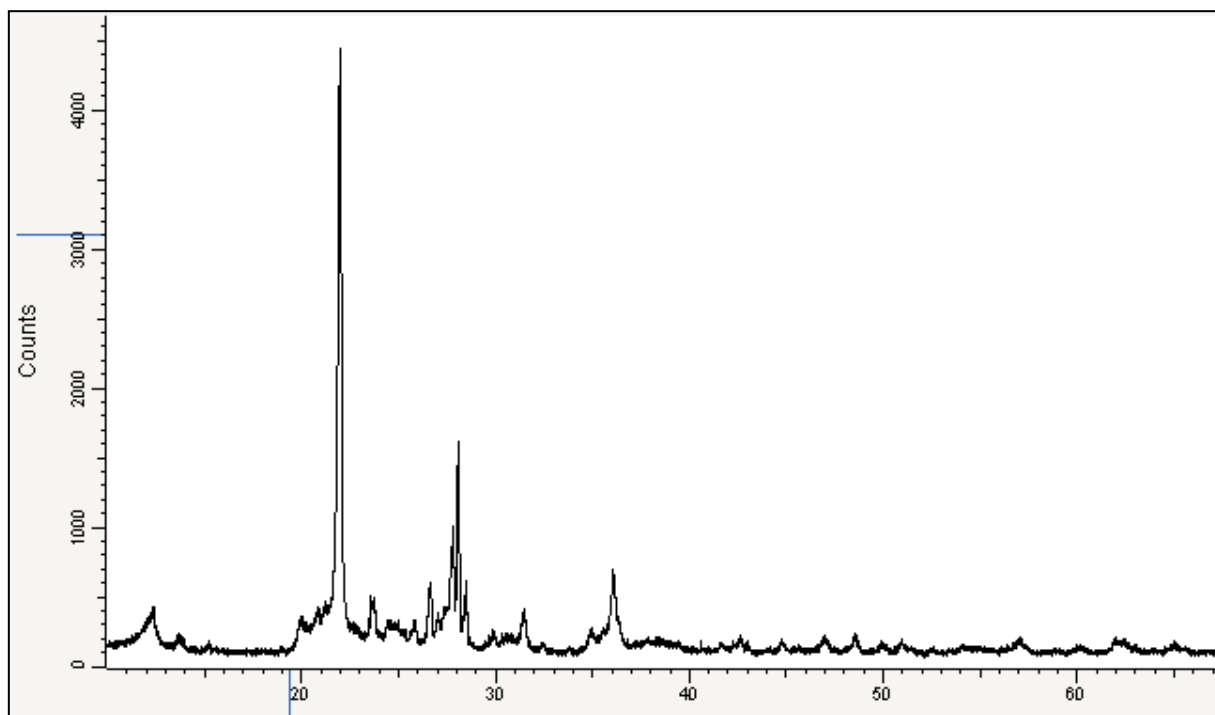


Grafico A.24. Difractograma de Caolín Tierra Blanca, sin activación (20°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

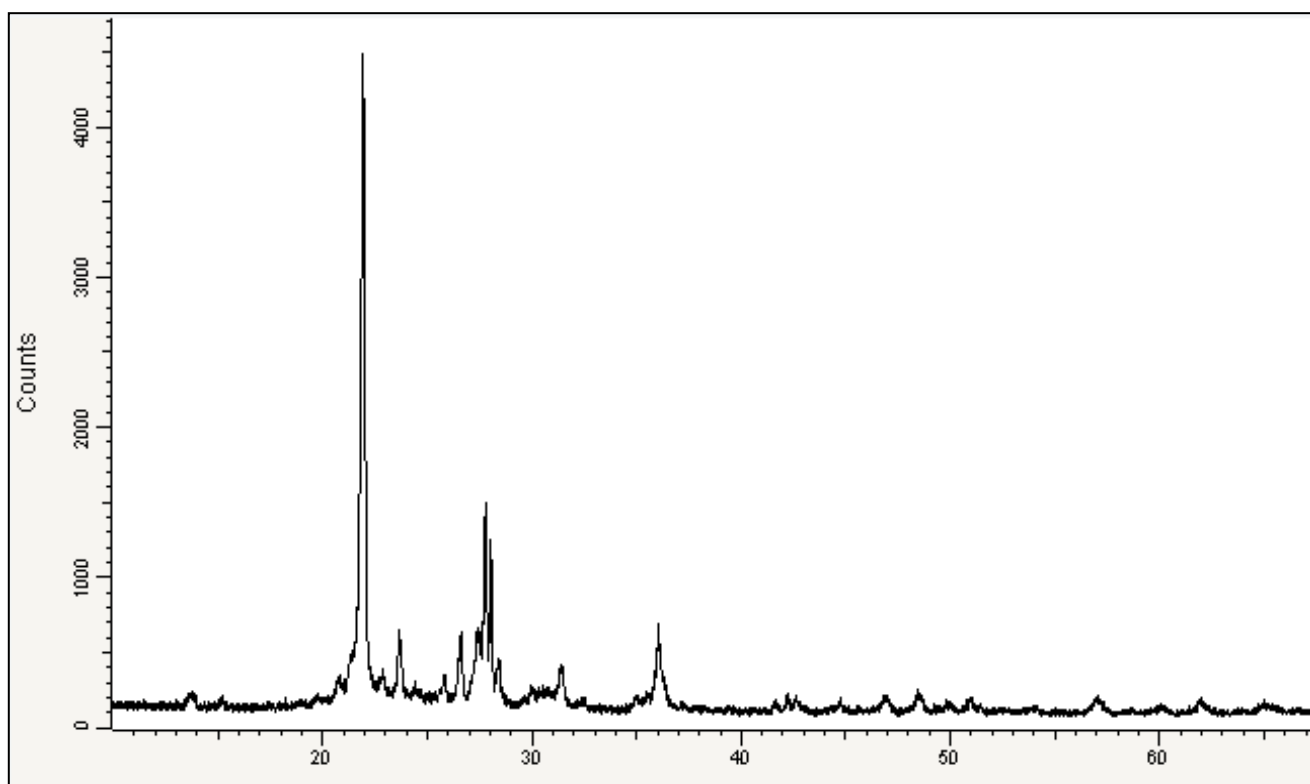


Grafico A.25. Difractograma de Caolín Tierra Blanca, activado (400°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

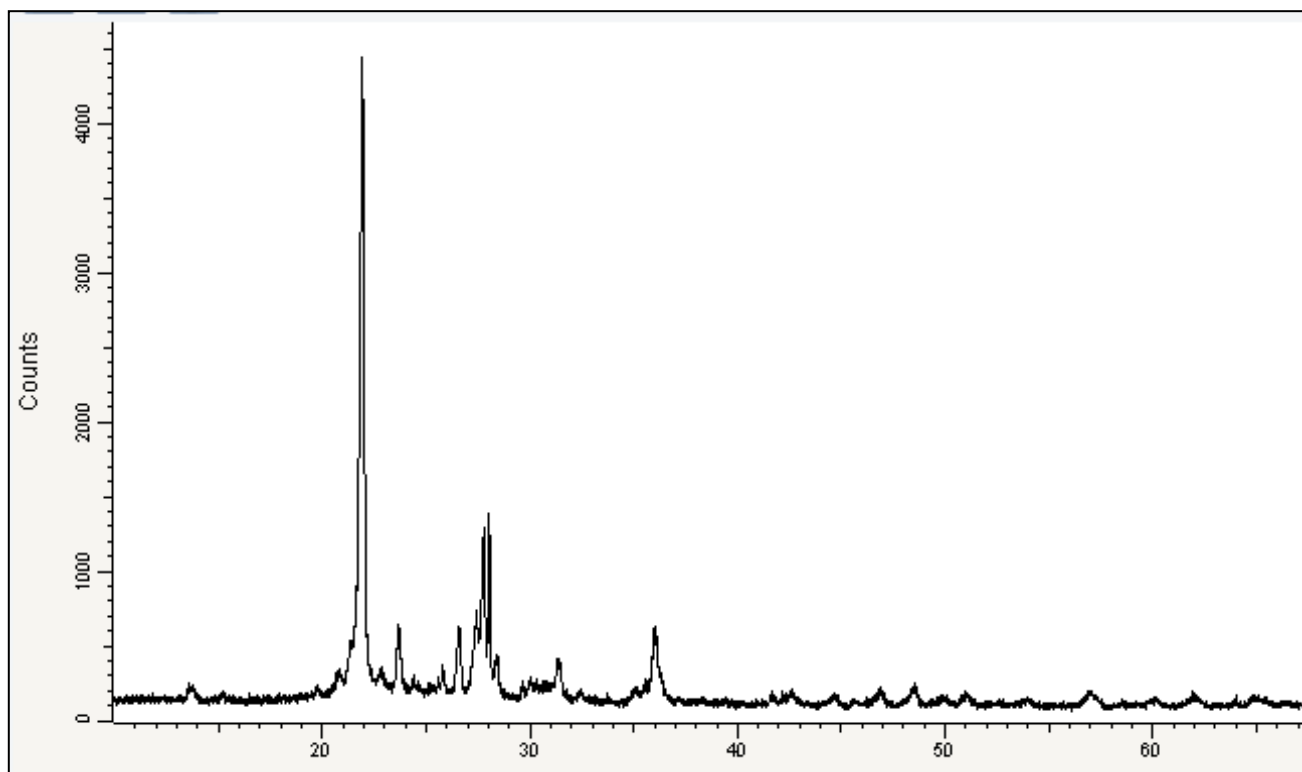


Grafico A.26. Difractograma de Caolín Tierra Blanca, activado (500°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

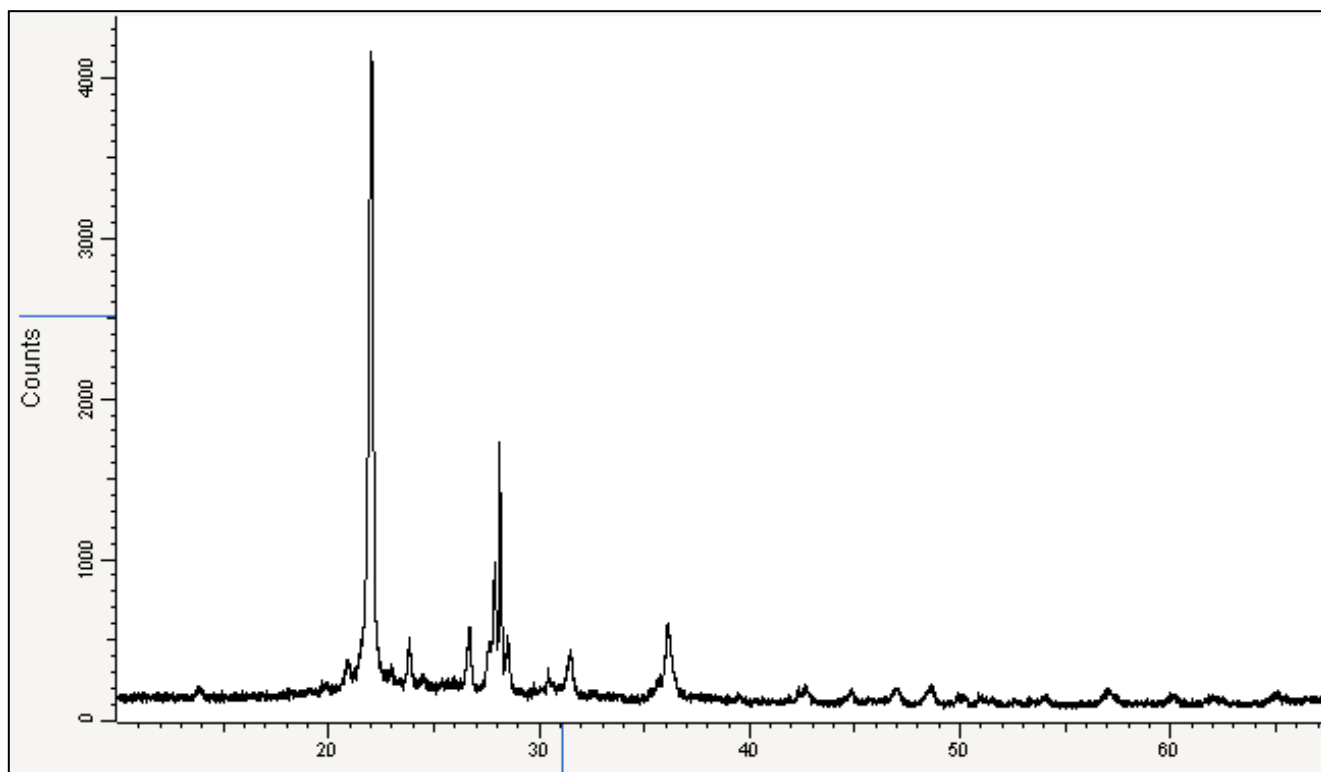


Grafico A.27. Difractograma de Caolín Tierra Blanca, activado (600°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

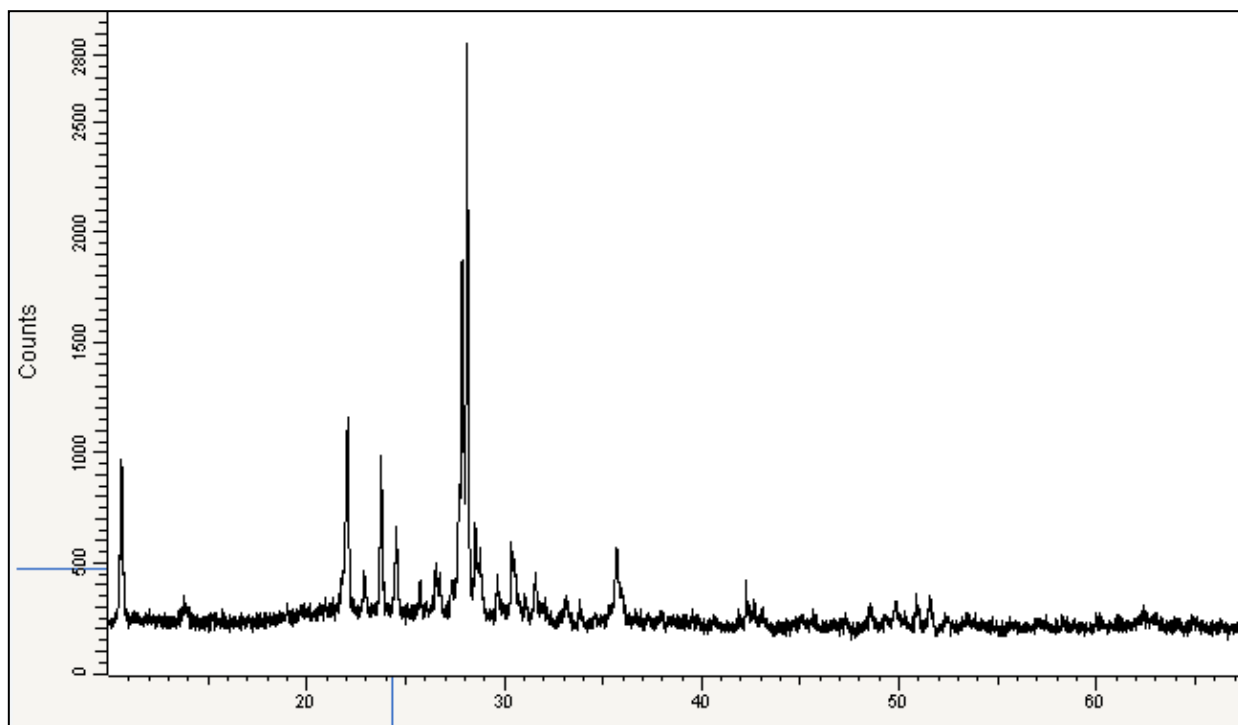


Grafico A.28. Difractograma de Pozzolana Déleg, sin activación (20°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

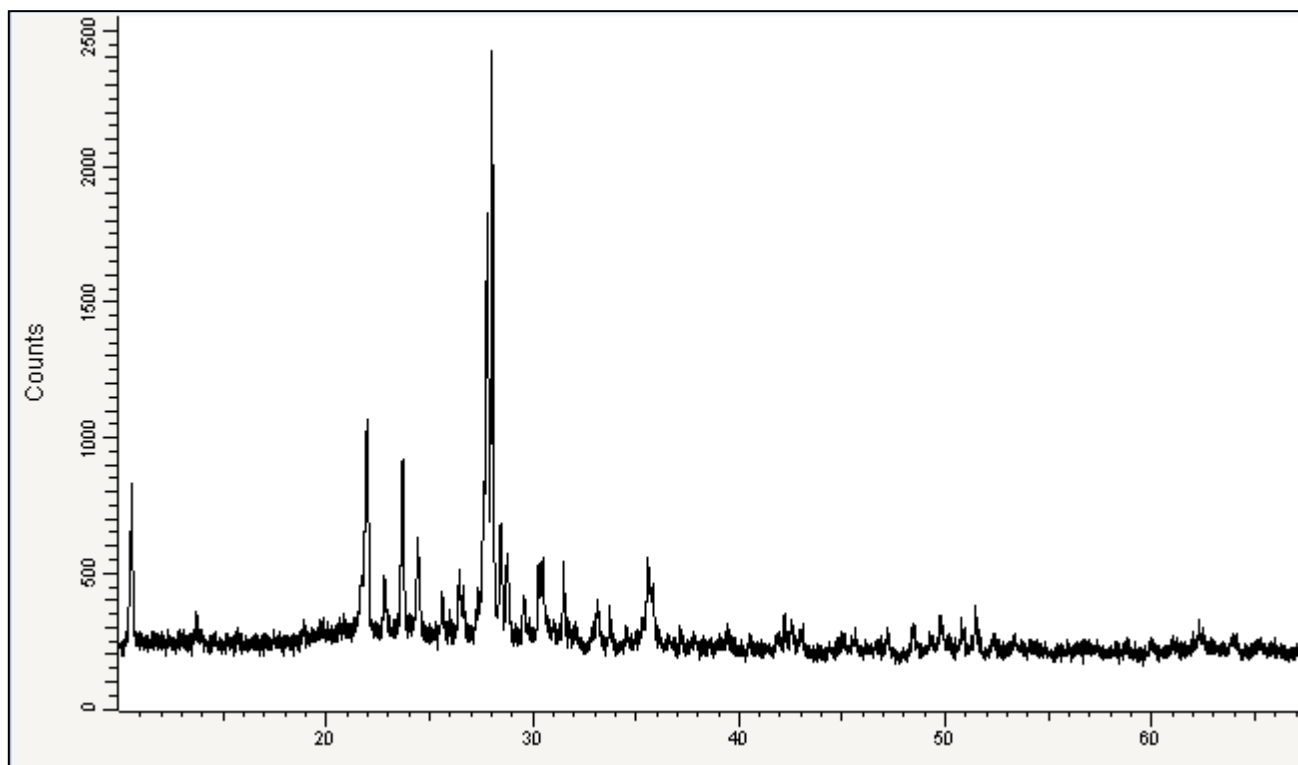


Grafico A.29. Difractograma de Pozzolana Déleg, activada (400°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

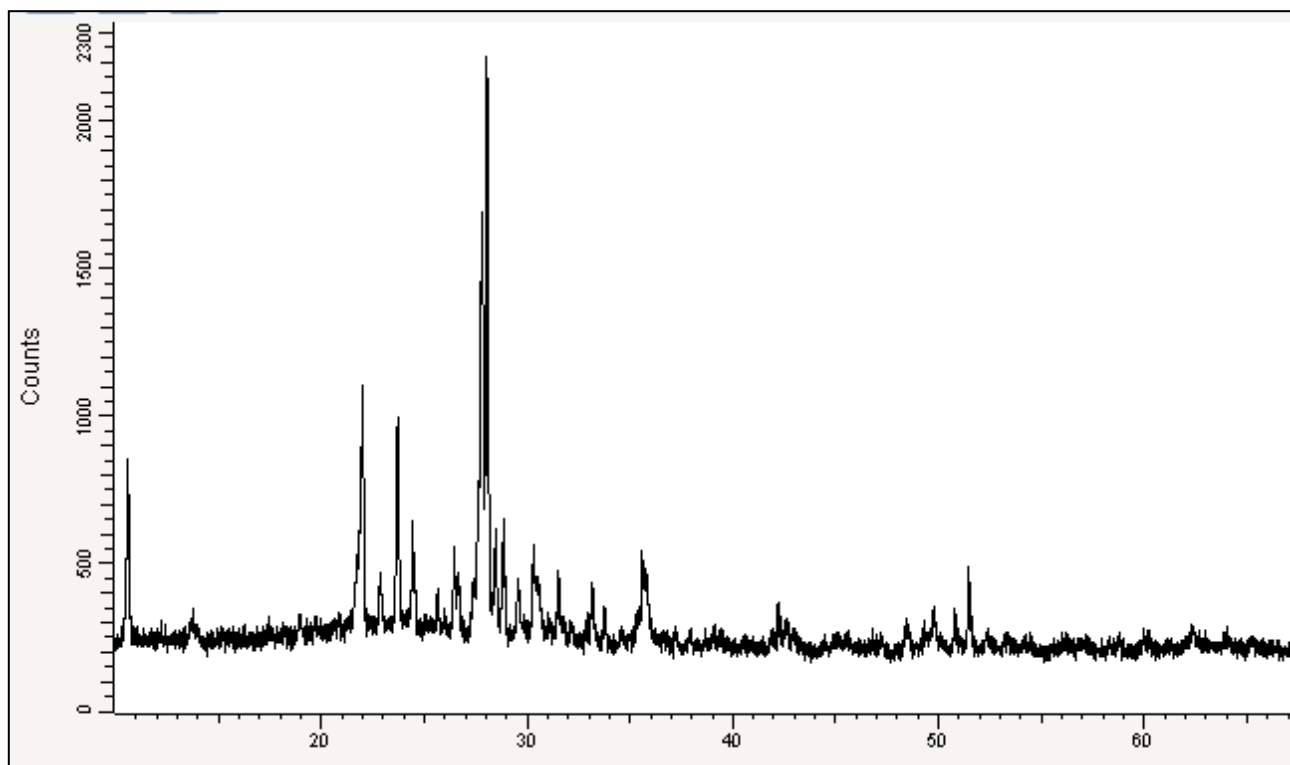


Grafico A.30. Difractograma de Pozzolana Déleg, activada (500°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

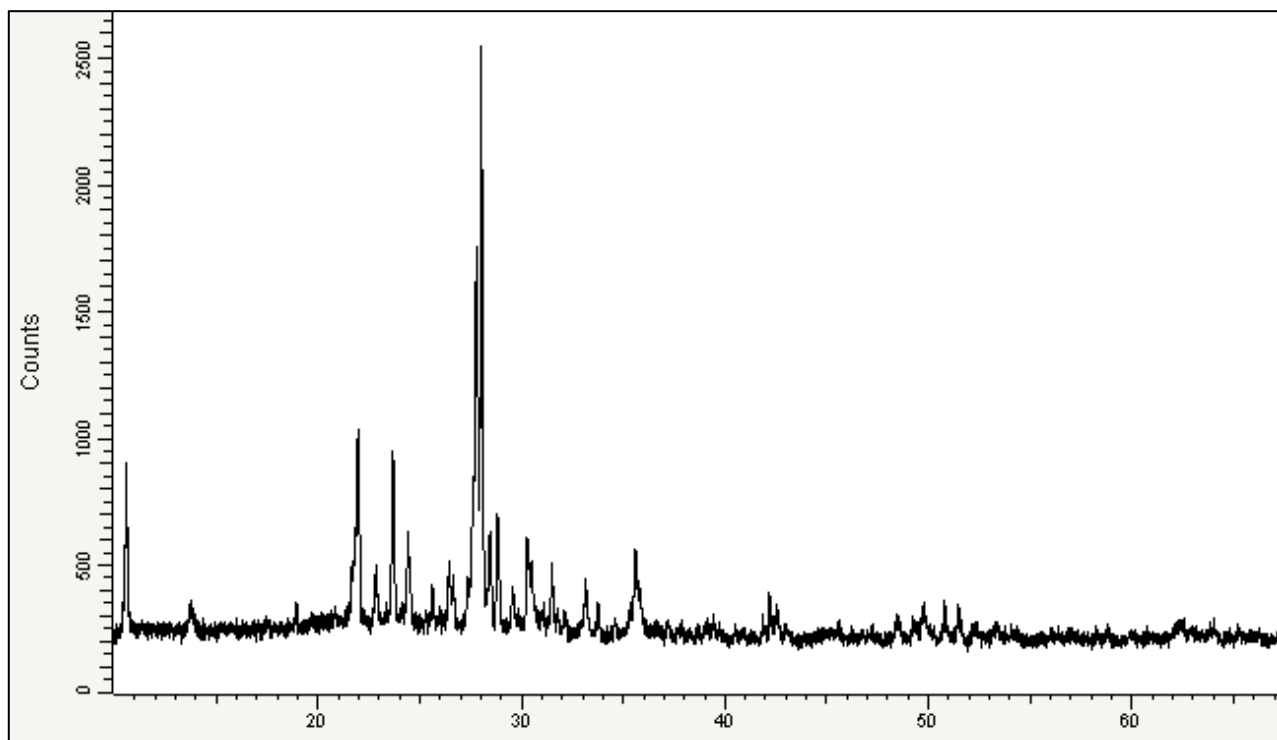


Grafico A.31. Difractograma de Pozzolana Déleg, activada (600°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).

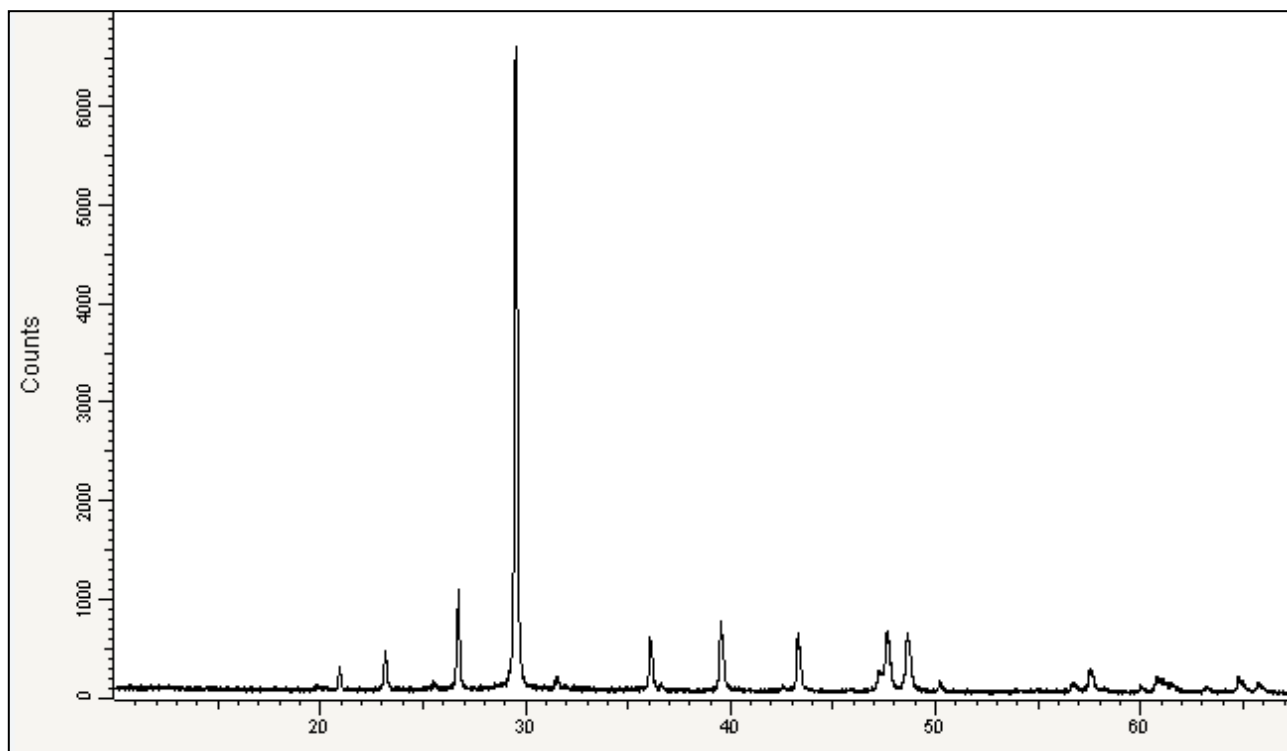


Grafico A.32. Difractograma de Polvos Torre de Rocío, activado (600°C).

Fuente: Delgado – Negrete, (2012).